République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draia ADRAR

Faculté Des Sciences et de la Technologie
Département Des Sciences et Technologie

Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master En Génie Civil

Option : Géotechnique et Matériaux des Structures

Présenté Par :

-KAZI-TANI WASSILA

THEME

COMPORTEMENT THERMIQUE ET MECANIQUE DES ADOBES TRAITES AUX FIBRES VEGETALES.

Soutenu Le 01/06/2016 Devant Un Membre De Jury Composé De :

Mme. BEKRAOUI	Univ- A.D Adrar	**Presidente**
Mr.HAMOUDA Abdelaziz	Univ-A.D Adrar	**Examinateur**
Dr.BEN NACER YASSINE	Univ-A.D Adrar	**Encadreur**

Année Universitaire 2015-2016

DÉDICACE

Je dédie cette réussite à :

Mes très chers parents pour

Leurs sacrifices, leurs patiences, et leurs

Encouragements tout le long de ma formation,

Mon frère et ma petite sœur chacun par son nom,

Ma famille KAZI-TANI

Mes amis et mes copines,

Mes enseignants.

Merci du fond du cœur

REMERCIEMENTS

A l'occasion de la présentation ce modeste travail qui a été réalisé au sein de l'université africaine. ADRAR, je tiens à dresser mon vifs reconnaissances et mon sincères remerciements à :

***Mr. BEN NACER** d'avoir bien accepté de m'encadrer et de me guider durant le déroulement de ce travail.*

*Mes vifs remerciements à **Mme. BEKRAOUI** pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury d'examen.*

*Je tiens à remercier **Mr. HAMOUDA,** pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail et de faire partie du jury de soutenance.*

*Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil : **Mr. BENHOUTIA**, **Mr. ABDELKARIM** pour leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.*

*Je voudrais exprimer ma gratitude **Mr. SEMCHA** et **Mr. MEKERTA.** C'était un très grand honneur d'être leur étudiante.*

Enfin un remerciement particulier et personnel à tous mes amis et collègues, mes copines

*Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont participé dans notre formation du primaire, jusqu'à l'université**, Merci infiniment**.*

Sommaire :

Dédicace……I

Remerciements……II

Liste de tableaux……....III

Listes de figures……..IV

Nomenclatures…….……V

Résumé……VI

Abstract……..…...VII

ملخص…….……VIII

INTRODUCTION GÉNÉRALE :.....1

CHAPITRE I:Partie bibliographique…….…….....

Introduction…….…2

I-Construire en terre :…….....3

I.1-PRESENTATION & HISTOIRES 3

I.2- Technique de construction en Terre crue: 5

- TECHNIQUE DE L'ADOBE : 5

-LA TECHNIQUE DU PISE :.....6

-LA TECHNIQUE DU TORCHIS : 7

-LA TECHNIQUE DE LA BAUGE.....7

-TECHNIQUE DE BLOCS EN TERRE:.....8

Exemples de constructions modernes en terre crue :.....……..…10

I.3-Valeurs de la terre dans la construction :……..…....12

-Pourquoi construire en terre?.....12

I.4-Climat, confort et construction: 14

Le confort thermique……..……15

Un peu d'histoire… 15

* De quel confort peut-il s'agir en construction? 16

I.5-La terre renforcée, un matériau de construction……..……17

1.Les argiles.....17

1.1. Microstructure des argiles 18

1.2. Classification des argiles 21

2.Les fibres. 26

2.1. Stabilisation par fibres 26

2.2 Différents types de fibres 26

a. Les fibres naturelles 26

Les fibres végétales : 26

Les fibres animales : 27

Les fibres minérales : 27

b. Fibres synthétiques 27

c. Fibres artificielles : 28

CHAPITRE II: Matériaux et matériels……....

I-Matériaux : 30

-La terre : 31

1. Définition : 31

2. Composition : 31

3. Rappel sur les argiles.....32

- identification de sol : 33

1-Limite d'Atterbeg : 33

2- Essai au bleu méthylène : 36

1-Objectif et principe de l'essai. 36

2-Propreté. 36

3-Matériel (essai manuel) 37

4-Mode opératoire 38

*Le test de la tache : 38

Conclusion :.....40

-Analyse chimique d'eau : 41

- Définitions générale : 42

Une fibre végétale : 42

-Préparation de l'échantillon (adobe) : 44

II-Matériels :.....46

A-Essai de compression : 46

B- l'essai thermique : 47

CHAPITRE III : Interprétation et discussion…….

1. Introduction.....50

2. Aspects mécaniques : 50

2.1. Essai mécaniques.....50

2.1.1. Essai de traction.....50

2.1.2. Essai de flexion.....51

2.1.3. Essai de compression 52

2.2. Effet du type de fibres sur les propriétés mécaniques des adobes :.....53

2.2.1. Détermination de la résistance à la compression.....53

2.2.2. Influence du taux de fibres sur les résistances mécaniques en compression.....57

3. Aspects thermiques 58

3.1. Généralités sur le transfert thermique 58

3.1.1. Le transfert thermique.....58

3.1.1.1. Champ de température 58

3.1.1.2. Gradient de température 58

3.1.1.3. Flux de chaleur.....59

3.1.1.4. Modes de transfert thermique.....59

3.1.1.5. Conductivité thermique 61

3.1.1.6. Résistance thermique 62

3.2.1. Influence du type de fibres végétales sur le comportement thermique des adobes…….. 63

Conclusion générale.

Listes de références.

Liste de tableaux :

Tableau (I.1): Résumé des différents types des argiles……..…Page 25.
Tableau(II.1) : L'analyse chimique d argile du gisement Adrar Nord….Page 32.
Tableau(II.2) : Résultats de la limite de liquidité……..…..Page 34.
Tableau (II.3) : Résultats des essais pour la détermination de la limite de la plasticité……..Page35.
Tableau (III) : variation de la résistance à la compression en fonction du type de fibres……....Page54.
Tableau(III.2) : résultats de la boite chaude……....Page 63.
Tableau(III.3):dimensions et masse des briques d'argile……..Page 63.
Tableau(III.4) :valeurs de la conductivité et de la résistance thermiqu….Page 64.

LISTE DES FIGURES.

-Chapitre I : Partie bibliographie.

Figure I.1 : Argile……. ……Page 3.

Figure I.2 : Manhattan de désert. Yémen…….. ……Page 3.

Figure I.3 : Mosquée de Djenné, MALI……. Page 4.

Figure I.4 : (a) et (b) technique de fabrication de l'adobe, (c) Maison en Adobe en construction……. Page 5.

Figure I.5 : Technique de pisé…….. Page 6.

Figure 1.6 : Technique de Torchis…….. Page 7

Figure I.7 : Technique de Bauge…….. ……..Page 7

Figure I.8 : Technique de Blocs de terre comprimée……. Page 8

Figure I.9 : La roue des techniques de construction en terre crue…… Page 9

Figure I.10 : La chapelle de la Réconciliation……Page 10

Figure I.11 :Maison moderne intégrant des murs en pisé à l'architecte colombien Jesus Antonio, Moreno, de la fundaction Tierra Viva.

(Source : Bati en terre, 2009)……. ……...Page 11

Figure I.12 : le NK'Mip Désert Interpretive Centre.

(Source : Bati en terre, 2009)…….… Page 11

Figure I.13 : Les deux empilements compact……..…Page 19

Figure I.14 :Structure de base d'un feuillet d'argile :(a) le tétraèdre de silicium et (b) l'octadédre d'aluminium…… Page 19

Figure I.15 : Représentation des empilements de tétraèdres silicieux et d'octaèdres alumineux (Cas de la Kaolinite), (Kanon,2006)……Page 20

Figure I.16 : Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre Alumineux (cas d'une illite). (Konan, 2006)…… Page 21

Figure (I.17) : Sphère de solvatation dans l'espace Inter foliaire d'une Montmorillonite……...Page 22

Figure (I.18) : Morphologie et structure schématique de la kaolinite…....Page 23

Figure (I.19): Forme conventionnelle l'illite……..Page 24

Figure (I.20) : Forme conventionnelle Montmorillonite…….. Page 24

Figure (I.21) : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)……. Page 27

Chapitre II : Matériaux et Matériels.

Figure (II.1) : limite d'Atterbeg……..Page 33.

Figure (II-2): Courbe de la limite de liquidité……..….Page34.

Figure (II-3): Mode opératoire de l'essai de la limite de plasticité…… Page35.

Figure II.4- matériels utilisés……...…Page37.

Figure II.5 : test négatif……...…Page 38.

Figure (II.6) : test positif …….……....Page 38.

Figure (II.7) : Analyse d'eau chimique…….....Page 41.

Figure (II.8) : Paille……..……Page42.

Figure (II.9) : Hafla……...Page42.

Figure (II.10)- Noyau de datte……....Page 43.

Figure(II.11) : Régime de palmier……...Page43.

Figure (II.12): matériaux utilisés pour préparer l'adobe……Page44.

Figure (II.13) : dimension de fibre 4cm……... Page44.

Figure (II.14) : moule de (9*9*9) cm……Page 45.

Figure(II.15) : échantillon obtenus après le démoulage……...Page 45.

Figure (II.16) : moule de (30*30*4) cm…… Page 45.

Figure(II.17) : échantillon obtenus après le démoulage……..... Page 45.

Figure (II.18) : l'appareil de compression…….….. Page 46.

Figure (II-19) : Version H112N……Page 47.

Chapitre III : Interprétation et résultats :

Figure(III.1) – Courbes représentatives des principaux types de comportement d'un matériau sollicité en traction uniaxiale : a- comportement fragile (fonte, verre),b- comportement ductile (acier doux), c- comportement élastique non linéaire(élastomère)……...Page50.

Figure(III.2) : Schéma de principe de l'essai de flexion points.……...Page51.

Figure(III.3) – Schéma de principe de l'essai de compression et les phénomènes observables…….Page 52.

Figure (III.4). Exemple de courbe de compression tracée à l'inverse par comparaison à celle de traction……..……..Page53.

Figure (III.5) : Evolution de la résistance à la compression en fonction du type de fibres de composition contenant (a) : 3 % (b) : 5% de fibres…..…….. Page56.

Figure (III.6) : Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes contenant de 0 à 5 % de fibres……...……... Page57.

Figure(III.7) : Histogramme de la variation de la conductivité et de la résistance thermique en fonction de types de fibres…….. Page 65.

Nomenclature

Symbole	Nom	
T1	Température de plaque chaude	C°
T2	Température de plaque froit	C°
T3	Température	C°
T	Moyen de température	C°
dT	Différente de température	C°
Pv	Température de l'entrée réfrigérante	C°
Hfm	Sortie du débitmètre thermique	mv
Is	L'épissure	m
V	Le volume	m3
M	La masse	kg
λ	Conductivité	W/m.K
R	La résistance thermique	W/m2.K
D	La Densité	Kg/m3
F	La force de compression	KN
S	La surface	m2
σ	Le contrainte	KN/m2

Résumé

Afin de valoriser les matériaux locaux et de contribuer à la réduction des coûts de construction et de l'énergie consommée pour le chauffage ou la climatisation, des fibres végétales, « Paille, Halfa, Noyaux de datte et Régime de palmier) ont été utilisées pour traiter les brique en terre (Adobe) a fin d'améliorer sa résistance.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des fibres végétales, sur le comportement mécanique et thermique de l'Adobe. L'étude s'est focalisée sur le traitement des Adobes fibrés. Dans ce cadre, on a utilisé quatre types de fibres végétales et du même pourcentage (3% ,22% d'argile, 75% de sable) mélangé avec 3 Litres d'eau, les pourcentages sont pris par rapport a la masse de l'échantillon.

Les résultats indiquent que (l'adobe+paille) a donné une très bonne résistance à l'essai de la compression. σ (paille)= 1086.42 (KN/m²).

-Tant dis que σ (régime)=160.49 (KN/m²) est la plus faible valeur obtenu d'essai de compression par rapport au σ (témoin) =419.75 (KN/m²), alors que les résultats attribué par le Noyaux de datte étaient plus meilleur que celle de Régime de palmier.

σ (noyau) = 333.34 (KN/m²).

-On observe aussi que l'ajout du Halfa à l'adobe augmente aussi la valeur de résistance σ (halfa) =567.90 (KN/m²) par rapport au témoin.

Tant dit que l'étude thermique montre que la conductivité thermique diminue et dépend considérablement des types de fibres. Donc l'adobe armé de fibres présente une meilleure propriété thermique. L'adobe témoin possède la plus haute valeur de la conductivité thermique.

Mots Clés : Adobe ; fibres végétales ; résistance à la compression ; conductivité, comportement thermique et mécanique.

ABSTRACT

In order to valorize local materials, to contribute to the reduction of construction costs and energy consumption for heating or cooling,

Plantfibres, «Straw, Halfa, Cores of date andRegime of palm) were used to treatthem brick of earth (Adobe) has at theend to improve its resistance.

The main objective of this job is to studythe effect of the use of the plant fibres,on the mechanical and thermalbehaviour of Adobe. Study was focusedon the treatment of Adobes fibres. Onthis occastion they used four types ofplant fibres and of the same percentage(3 %, 22 % of loam,75 % of sand)

blended with 3 Litres of water,percentages are taken by report has themass of the sample.

Results point out that (adobe+paille)gave a very good resistance of compression. σ (straw) =1086.42(KN / m ^{2}).

- So much say that σ (regime =160. 49) fromtrial of compression in comparison with σ (witness) =419. 75 (KN / m ^{2}) (KN / m ^{2}) is the weakest value got while results allocated by Cores of date were more better than that of Regime of palm. σ (core) = 333. 34 (KN / m ^{2}).

They also notice that the addition ofHalfa in the adobe also augments thevalue of resi stance σ (Halfa)=567.90)(KN / m ^{2}) in comparison with thewitness.

So much said as thermal study showsthat thermal conductivity diminishesand depends considerably on types offibres. Therefore the adobe armed withfibres introduces a bet ter thermalproperty. The adobe witness has thehighest value of thermal conductivity.

Key Words: Adobe; plant fibres;resistance to compression; conductivity,thermal and mechanical behaviour.

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Les sites archéologiques découverts dans de nombreux endroits à travers la planète témoignent de la maitrise de l'homme des techniques de construction à base de la terre crue depuis les premières civilisations. Aujourd'hui on estime que l'habitat d'un tiers de l'humanité est encore en terre. Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis a l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction jamais connues auparavant, nous enregistrerons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans plusieurs pays y compris les pays industrialisés profitant du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques. Une des raisons de l'importance de la terre dans la construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. La mise en œuvre doit être relativement aisée et fait appel à un outillage réduit, souvent d'origine paysanne. Pour ces raisons, la construction en terre crue concerne essentiellement le bâti rural, même s'il existe de nombreux exemples de constructions en terre crue en milieu urbain. Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. Mais le problème des constructions en terre, c'est qu'elles souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à éviter les inconvénients du matériau terre, en utilisant plusieurs moyens de stabilisation permettant d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) et autres. Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique de l'adobe est la plus ancienne une technique, elle permet d'avoir une brique en terre séchées à l'air libre et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage comme matériau principal dans un mur porteur. Pour obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques de l'Adobe, réduction de sa porosité, variations Introduction générale 3 de volume (gonflement et retrait) et amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie

(réduire l'abrasion de surface et la perméabilité du bloc), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés: comme le ciment, la chaux, le bitume, les fibres,….etc. La stabilisation des de l'Adobe par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille est employée de par le monde depuis l'antiquité. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A par exemple, on incorpore encore très souvent de la paille, combinée avec du bitume. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connait aussi l'emploi des fibres pour construire en torchis, en terre-paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (Houben, 2006) [1]. Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement (Estabragh,2011; Prabakar,2002). S'il est confirmé actuellement que la stabilisation des de l'Adobe par des fibres végétales améliore leurs résistances mécaniques et leur insensibilité à l'eau (Houben, 1994).

La stabilisation de l'Adobe par des fibres n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs **[2]**.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides.

Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. Dans cet esprit, une loi sur la promotion des Energies Renouvelables a été d'ailleurs promulguée en août 2004 (Benouali, 2011)[3]. L'Algérie compte plus de 17 millions de palmiers dont plus de 800 variétés de dattes (Benziouche, 2012) [4]. Les travaux annuels d'entretien des palmiers génèrent des quantités importantes de déchets composés essentiellement de palmes et de fibres de surface, qui peuvent être utilisés comme renfort fibreux dans les produits de terre. La paille elle aussi est caractérisée par son abondance dans les zones rurales et désertiques, et par son faible coût. Pour une exploitation rationnelle de ces fibres dans les constructions de la région et plus précisément dans la production de brique en terre (Adobe), en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s'accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions de l'Algérie, et plus précisément la région sud du pays,

et ceci pour améliorer la situation de la population face à la pénurie d'habitat surtout dans les zones rurales.

On a mené cette étude dans le but d'examiner les propriétés mécaniques et thermique de brique en terre (Adobe) avec des fibres végétales, il s'agit ici principalement des fibres végétales tel que : « fibres de palmiers dattiers (noyaux de dattes et régime de palmiers), Halfa et Paille ».

L'intérêt de ce travail est d'étudier le comportement thermique et mécanique en compression de l'Adobe fibré.

Outre l'introduction générale, cette thèse est structurée en trois chapitres : La première il s'agit étude bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier l'Adobe, histoire de construire en terre et pourquoi doit on la choisir comme premier lieu. Ce chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (Le sol, et les différents types de fibres).

Et à la fin une notion globale sur le confort thermique.

Le deuxième chapitre, présente les matériaux et matériels utilisés a fin d'aboutir ce travail : en 1^{ier} lieu l'identification de sol et l'analyse chimique d'eau étaient nécessaire, en suite une description de chaque essai avec son matériels.

Casagrand pour les limites d'Atterbeg, le H112N pour les essais thermiques et l'appareil a la compression pour les essais mécaniques.

Ce chapitre présente aussi la préparation des échantillons pour les essais thermiques et mécaniques, dont on a suggérer les valeurs suivantes par rapport a la masse de l'échantillon : (3% de fibres végétales+ 22% d'argile + 75%de sable , mélanger avec 3 litres d'eau) et laisser séché à l'air libres pendant 14 jours.

Le 3ième chapitre, est consacré à l'étude expérimentale.

Ce chapitre présente les essais de l'étude thermique et mécanique effectués le long de ce travail.

Les résultats obtenus montrent que la Paille et la Halfa on une influence d'amélioration sur le comportement thermique et mécanique compression.

Les résultats illustrent l'utilisation de la Paille dans la construction traditionnelle avec l'Adobe par nos arrières grands pères.

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

CHAPITRE I:
Partie bibliographique

Introduction.

La terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes depuis des milliers d'années. On estime qu'aujourd'hui plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des habitas en terre.

La terre est un matériau disponible tout le temps et partout. Son utilisation comme matériau de construction exploite l'une de ses propriétés qu'est la cohésion qui joue le rôle de liant naturel.

-On dénombre de très nombreux modes de construction avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. Douze modes d'utilisation de la terre en construction ont été recensés dont six, sont très couramment employés et constituent les genres techniques majeurs.

-La construction en terre a traversé les siècles et les continents sans jamais tomber dans l'oubli, la terre comme la l'argile sont des matériaux qui ne demandent pas ou peu de transformation et qui se trouvent au même sol sur tous les continents. La construction en terre crue, contrairement à la terre cuite, ne demande aucune industrialisation : c'est réellement le matériau au pied du mur qui fait le bâti. Sa qualité thermique a permis de l'utiliser des pays scandinaves jusqu'à l'équateur. Depuis 10 000 ans, la terre crue a accompagné l'homme dans son habitat. Elle a d'abord servi d'enduit pour protéger les huttes de bois, puis la brique de terre crue - composée d'alluvions sableuses et argileuses mélangées à de la paille - est devenue le matériau de construction des premières villes en Mésopotamie à l'époque de la sédentarisation. Sous toutes les latitudes, les villes ont été bâties en terre crue, de l'Egypte au Moyen-Orient, en Afrique, mais aussi en Amérique et en Europe. Chaque pays, chaque région, chaque groupe ethnique apporte sa créativité pour façonner la terre. Elle est utilisée pour tous les types de constructions, de l'habitat rural à l'habitat urbain, des souks aux temples, du manoir à la forteresse, de l'église à l'usine. Aujourd'hui, et ce dans plus de 150 pays, près de deux milliards de personnes vivent dans des habitations en terre crue, soit un tiers de la population mondiale.

I-Construire en terre :

I.1-PRESENTATION & HISTOIRE

Terre crue, banco ou adobe sont les termes utilisés designer la terre, utilisée avec le moins de transformations possible en tant que matériau de construction.
Le terme terre crue permet surtout de marquer la différence avec la terre cuite: en effet, dans la construction occidentale contemporaine, le matériau terre trouve le plus couramment sous sa forme cuite (briques de terre cuite, tuiles).

Figure (I.1):Argile .

Plusieurs techniques de construction utilisant la terre crue comme matériau structurel existent: le pisé, la bauge, l'adobe, la brique de terre compressée.

La terre crue est un matériau économique : l'extraction ne nécessite pas de moyens technologiques importants; l'utilisation est réalisée sans transformation; l'acheminement est réduit. Tous ces facteurs limitent les coûts. Sur le plan technique c'est un matériau très isolant aussi bien phoniquement que thermiquement.

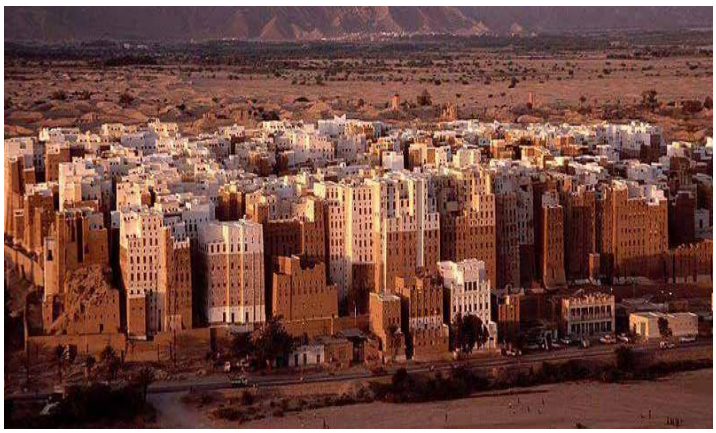


Figure (I.2):Manhattan deDésert (Yamen).

Sans s'étendre sur les aspects techniques, déconstruisons quelques idées reçues: la terre crue n'est pas le matériau des pauvres, elle permet de se loger dans des conditions très confortables et durables, en témoigne les architectures du passée comme le Palais de **l'Alhambra** à **Grenade** (Classée patrimoine mondial par l'**Unesco** depuis 1984) ou comme les constructions contemporaine allant des logements sociaux jusqu'à la maison d'architecte.
Elle n'est pas réservé à l'habitat individuel: elle peut répondre au besoin de densité par des constructions collectives qui peuvent atteindre 6 étages comme par exemple la ville de **Shibam** dans le **Yémen** surnommé **« la Manhattan du désert** » ou ce que l'on peut considérer comme les premiers logements collectifs de l'histoire construit par les Chinois au XIIème siècle reassembling près de 800 personnes d'un seul tenant: c'est dire à quelle point cette technique, réactualisée avec nos moyens modernes et notre force mécanique de 2010, présente un grand potentiel.

Figure (I.3) Mosquée de Djenné, Mali

Par sa plasticité et plus encore lorsqu'elle est associé à une structure en bois, elle résiste bien au séisme pourvu que les dispositions constructives soit respectée. Enfin pour beaucoup de pays sans ressource pétrolière c'est un instrument d'indépendance économique, culturelle et l'occasion de créer de l'emploi en lançant des programmes de constructions. C'est le cas de l'expérience initiée en Egypte par l'architecte Hassan Fathy dans les années 50 qui a construit des milliers de logements en terre en revisitant et modernisant l'architecture traditionnelle, en formant une main d' œuvre locale et en divisant par 5 le coût par rapport au béton avec un confort accrue: en effet dans ces pays.

I.2- Technique de construction en Terre crue:

- TECHNIQUE DE L'ADOBE :

L'adobe est une brique de terre crue, façonnée à la main ou moulée à l'état plastique, puis séchée à l'air libre (Figure I.1.a et I.2.b). Elle offre la possibilité d'édifier la quasi-totalité d'un bâtiment sans faire appel à d'autres matériaux (Figure I.3.c), puisque des murs mais aussi des arcs, des voûtes et des coupoles peuvent être construits en brique. L'adobe est donc extrêmement économique, y compris dans les pays en développement, où les briques et la construction sontréalisées presque sans outils.

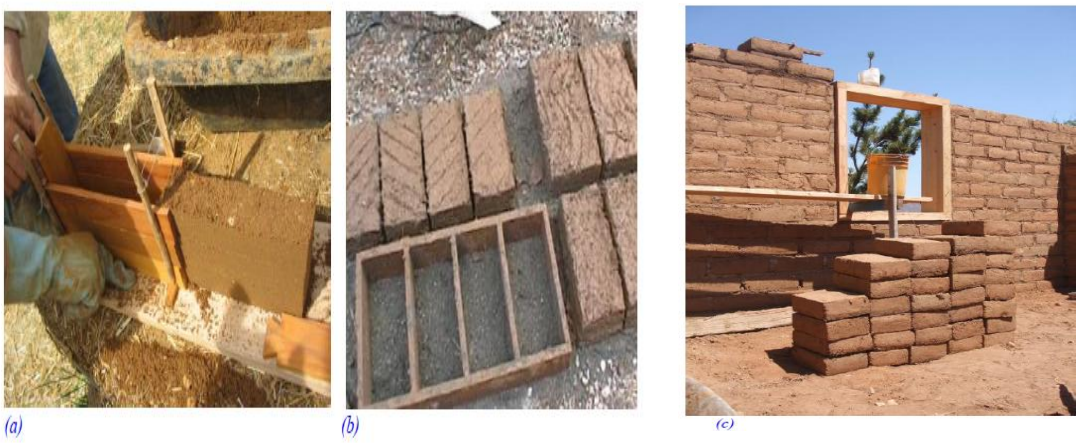
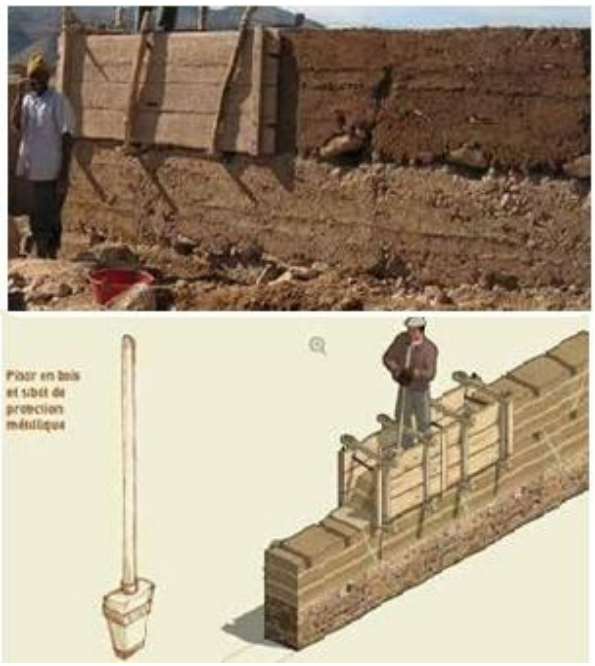


Figure I.4: (a) et (b) Technique de fabrication de l'adobe ; (c) Maison en adobe en construction.

-LA TECHNIQUE DU PISE :



Le pisé est un procédé de construction de murs en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide d'un pilon (ou dame, pisoir, pisou).

La terre utilisée était généralement extraite dans l'environnement immédiat de la construction, ou issue du décaissage du terrain pour réaliser une cave. Depuis les années 1980, aux quatre coins du monde, le pisé connaît un grand renouveau.

Figure (I.5): technique de Pisé

*Le pisé s'élève normalement sur une assise maçonnée de galets de moellons de pierre, selon les ressources de la géologie locale.

Les ouvertures d'origine dans le pisé sont la plupart du temps superposées verticalement. Les encadrements, en bois ou en briques ne se trouvent que du côté extérieur. Ils ne dépassent jamais le nu du mur à cause du coffrage qui les enserre.
Les parties les plus exposées des murs, angles et encadrements, sont souvent renforcés, soit par des lits de mortier de chaux horizontaux plus rapprochés ou triangulaires en forme de «sapin», soit par des briques cuites, du béton de mâchefer ou du béton de ciment Portland.

-LA TECHNIQUE DU TORCHIS :

Le torchis est une technique de remplissage en terre crue.

Il s'agit de remplir les vides d'une armature porteuse en bois (charpente en pan de bois), avec un mélange de terre et de paille enroulé autour de lattes de bois (ou éclisses). Torchis, vient de «tordre», de «torche», car sa pose traditionnelle consiste à poser de la paille ou du foin torsadés dans une boue ou pâte de limon argileux sur des éclisses ou des gaulettes entre les colombages.

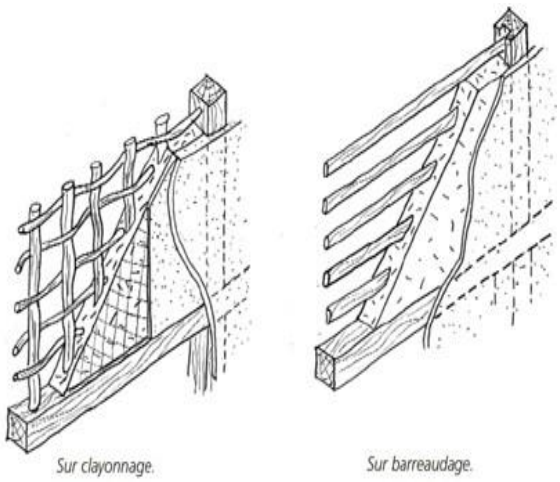


Figure (I.6): technique de torchis.

On peut distinguer 2 grands types de mélange:

- **Le torchis lourd** : beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature.

Sa conductivité thermique λ (lambda) est de 1,05. Il possède une masse volumique de1400 kg/m3 (1 800 kg/m3 humide). Il privilégie l'inertie et l'accumulation thermique (chaleur, l'hiver ou fraicheur l'été).

- **Le torchis allégé :** beaucoup de paille et un peu de terre. Sa conductivité thermique λ (lambda) est de 0,12 à 0,15. Il possède une masse volumique de 300 à 400 kg/m3. Il privilégie donc l'isolation, il est 9 fois plus isolant que le torchis traditionnel, car il renferme beaucoup d'air statique.

Aujourd'hui, les techniques de fabrication du torchis sont adaptées aux constructions anciennes. Elles permettent d'utiliser des terres prêtes à l'emploi.

-LA TECHNIQUE DE LA BAUGE

La technique de la construction en bauge consiste en l'édification de mur massif, souvent porteur, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales voire animales mis en œuvre par empilement de motte à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage.

Les murs sont constitués d'une succession de couches de terre dites levées généralement d'une soixantaine de centimètres de hauteur.

Figure (I.7): technique de la bauge.

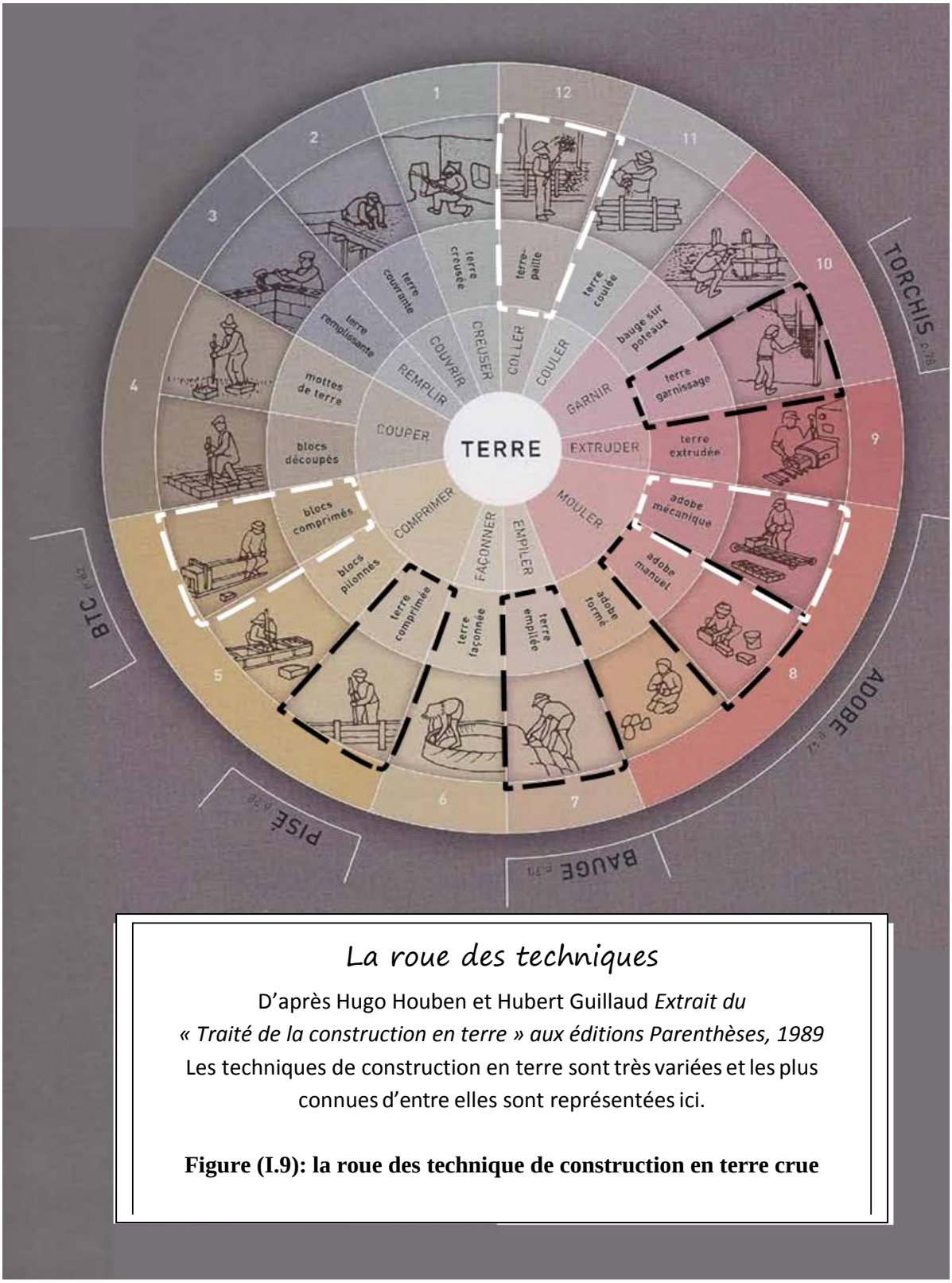
Montée la plupart du temps à la fourche, la levée encoremeuble était compactée au bâton, éventuellement taillée au paroir, bêche plate et tranchante, avant d'être lissée ou recompactée.
Selon, le type de mise en œuvre, il fallait ensuite une à quatre semaines de séchage avant de pouvoir mettreen place la levée suivante pour laquelle un nouveau mélange d'eau, de terre et de fibres étaient réalisé. Selon la granularitédelaterre, l'élasticité du mélange et le savoir-faire du maçon, la hauteur des levees pouvait varier entre cinquante centimètres et un mètre vingt, la largeur entre cinquante centimètres et quatre-vingt centimètres.

-TECHNIQUE DE BLOCS EN TERRE:

Les blocs de terre comprimée (BTC), sortes de pisé en briques, sont fabriqués dans des presses qui compriment de la terre humide et pulvérulente. Cette technique récente présente, comme celle des adobes, les avantages liés à la maçonnerie de briques. Si faire appel à une presse demande un investissement plus conséquent, les blocs obtenus sont immédiatement stockables (figure 1.5), contrairement aux adobes qui doivent sécher sur des vastes aires de production avant de pouvoir être manipulées.

Figure (I.8): Blocs de terre comprimée.

Aujourd'hui, ce sont les techniques de l'adobe, du pisé et du bloc comprimé qui sont les plus utilisées et même abordées à un très haut niveau de recherche scientifique et technologique.



La roue des techniques

D'après Hugo Houben et Hubert Guillaud *Extrait du « Traité de la construction en terre » aux éditions Parenthèses, 1989*

Les techniques de construction en terre sont très variées et les plus connues d'entre elles sont représentées ici.

Figure (I.9): la roue des technique de construction en terre crue

Exemples de constructions modernes en terre crue :

On trouve aujourd'hui de plus en plus des constructions modernes en terre crue à travers le monde. A titre d'exemple, la chapelle de la Réconciliation a été construite entre 1990 et 2000 (figure I.10). Le bâtiment se compose de deux enveloppes ovoïdes légèrement déformées. La première est constituée de lattes de bois verticales et ajournées. Le second est un mur courbe et massif, en pisé, mélange de terre naturelle et de débris de briques pilées provenant de l'ancienne chapelle, qui fut détruite en 1985 car elle se trouvait au milieu de la zone frontière entre l'Allemagne de l'Ouest et de l'Est. Ici, l'emploi de la terre renforce le caractère mystique de l'intérieur de la chapelle.

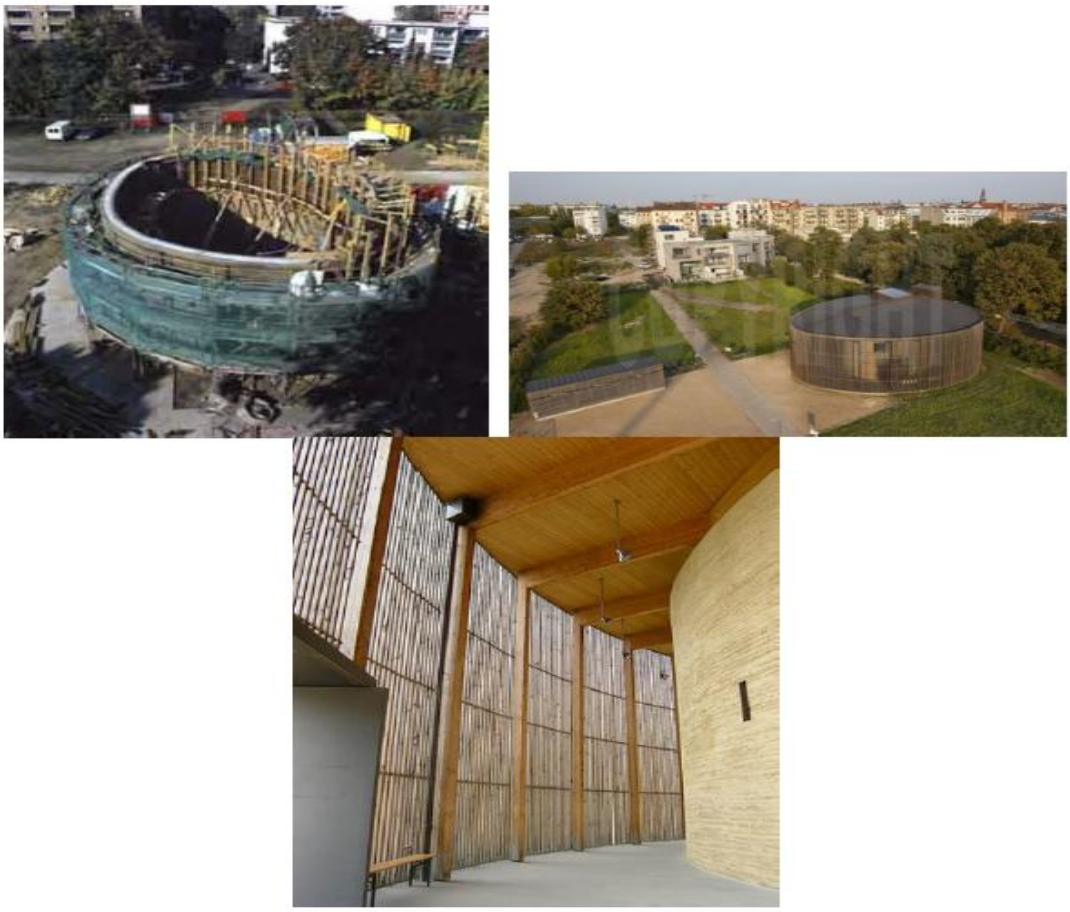


Figure (I.10) : La chapelle de la Réconciliation.

La figure (I.11) présente une maison moderne intégrant des murs en pisé à l'intérieur d'une structure vitrée. Autre construction en pisé, Le Nk'Mip Desert Interpretive Centre a été conçu au Canada par le cabinet d'architecture Hotson Bakker Boniface Haden (figure I.12). Les lignes colorées du mur en pisé, bâti avec les terres locales mélangées à des pigments, ont été intentionnellement accentuées pour évoquer les strates géologiques des roches sédimentaires.

Figure(I.11): Maison moderne intégrant des murs en pisé à l'intérieur d'une structure vitrée.
Conçue par l'architecte colombien Jesus Antonio Moreno, de la Fundacion Tierra Viva.
(Source :Bâtir en terre, 2009).

Figure (I.12) : Le Nk'Mip Desert Interpretive Centre. (Source : Bâtir en terre, 2009).

I.3- Valeurs de la terre dans la construction:

Notre société vit un profond changement depuis la fin du XXème siècle. Dans le milieu de la construction comme dans d'autres domaines, par exemple en agriculture, le développement durable comme mode de pensée et d'action est aujourd'hui un paramètre indissociable de l'élaboration des projets afin de répondre aux grands défis de la société sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins (définition du éveloppement durable donnée dans le rapport Brundtland en 1987).[6]

Le développement durable est un terme qui est lui-même apparu à la fin du XXème siècle. Il désigne la prise en compte des quatre piliers que sont le social, l'économie, l'environnement et la culture dans les réponses apportées aux problématiques actuelles.

- La construction de logements neufs non énergivores pour limiter l'utilisation des ressources non renouvelables comme le gaz et le pétrole, et respectueux de leur environnement a fin de limiter leur empreinte environnementale (responsabilité environnementale).

- La conception de logements en fonction d'un contexte donné afin de protéger les diversités architecturales et culturelles locales et grâce à une démarche participative pour intégrer l'Homme dans le processus de conception et de fabrication de l'habitat.

Dans ce contexte, **la valorisation de la construction en terre pour la construction de demain prend tout son sens.** En effet, **au regard des critères du développement durable**, elle répond à la totalité de ces enjeux et **trouve** logiquement **sa place dans la conception et la production d'un habitat éco-responsable.**

-Pourquoi construire en terre?

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire d'expliciter clairement l'intérêt et les² avantages de l'utilisation de la terre crue, dans l'habitat notamment. Et ils sont nombreux, tout comme les techniques constructives envisageables.

Les **avantages environnementaux** de l'emploi de la terre crue sont évidents : c'est un **matériau naturel** entièrement **recyclable**. Il doit être pensé en **circuit court**, c'est à dire que l'extraction de la terre doit être faite in-situ ou proche du lieu de chantier. La notion de matériau local prend ici tout son sens, réduisant ainsi les coûts d'extraction, les coûts de transformation et les coûts de transport. Traditionnellement comme de nos jours, les techniques employant de la terre crue ne demandent que peu d'outils. Quand on sait que le secteur du bâtiment est un des plus consommateurs en énergie, cela joue en faveur des techniques peu énergivores. Enfin, l'emploi de matériaux locaux et naturels pèsent sur le bilan carbone et l'empreinte écologique des constructions.

Cela nous amène logiquement sur son **intérêt économique**. De ce point de vue là, le matériau est rentable puisque si l'on travaille avec de la terre extraite près du chantier, sur son site de

production et de tranformation, elle ne coûte rien. La **matière première** est bel et bien **gratuite**. De plus, quand il s'agit de restauration d'un bâti en terre, la terre déjà présente peut-être réutilisée afin de réaliser les nouveaux travaux. Il y a des cas où la terre est achetée (prête à l'emploi, en big bag, ect) mais cela se réduit à des travaux en milieu urbain ou quand il n'y a pas de terre. Dans ce cas là, se pose la question de la pertinence de son utilisation. De manière plus générale et hormis le cas des autoconstructeurs, quand les travaux sont confiés à des artisans c'est une manière de plébisciter l'**économie locale**. En utilisant des produits et des entreprises locaux, cela favorise les circuits courts et bénéficie directement à l'**activité économique d'un territoire**.

Si l'on regarde de plus près l'intérêt de la terre dans l'habitat et sur ses occupants, il faut regarder le côté sain du matériau. Sa mise en oeuvre et sa présence ne nuit ni à la santé des artisans qui la travaillent ni à celle des habitants. Au vue du temps passé dans nos habitations, il est important de choisir des **matériaux sains** afin de **protéger notre santé**. Contrairement à certains produits de finition qui contiennent des Composés Organiques Volatiles (COV), les enduits en terre ne dégagent aucune émanation toxique voire cancérigène pour l'homme.

La terre apporte également un **confort intérieur** indéniable. Elle a des **qualités thermiques** comme l'**apport d'inertie et** la **régulation de l'hygrométrie** qui permettent d'avoir une ambiance intérieure chaude et saine tout au long de l'année.

L'inertie est la capacité d'un matériau à emmagasiner et à restituer la chaleur de manière diffuse. Cela permet d'obtenir un **déphasage thermique** dans le temps par rapport aux températures extérieures. La terre, le sable, les mortiers de chaux sont des matériaux ayant une forte inertie. Ce sont des matériaux lourds qui doivent être associés à une bonne isolation afin d'optimiser le confort d'été comme d'hiver.

L'hygrométrie caractérise l'humidité de l'air, c'est-à- dire la quantité d'eau sous forme gazeuse présente dans l'air humide. La terre est un **matériau respirant**, qui permet de réguler de manière naturelle la vapeur d'eau qui doit circuler librement dans l'habitation pour ne pas causer de dégâts. Concrètement une paroi perspirante permet des échanges gazeux et **régule l'humidité ambiante intérieure** en absorbant et en restituant naturellement la vapeur d'eau (émise par notre respiration, l'utilisation de la salle de bain ou lorsque nous cuisinons).

De plus, le terre apporte un confort acoustique entre deux pièces.

Donc, la terre propose une **inifinité de possibilité**.

I.4-Climat, confort et construction:

Le climat a une grande influence sur la santé et la longévité de l'homme.
Huttington (1924) fut parmi les premiers à énumérer les effets du climat sur le développement de la civilisation. La conclusion générale tirée est que la santé de l'homme est optimale à une température et humidité relative données.

Markham (1947) a démontré que les conditions climatiques idéales ne sont pas étrangères à l'occurrence des premières civilisations en Egypte, en Sumérie et en Palestine et qu'il doit exister une importante corrélation avec les conditions climatiques prévalant sous ces latitudes.

Certaines études ont montré que l'homme ne peut passer au stade de performance intellectuelle sous des conditions climatiques difficiles. L'exemple de l'Europe est, à ce sujet, édifiant. Certaines recherches affirment que l'Europe n'a pu arpenter le chemin de la Modernité qu'après avoir maitriser les technologies du chauffage qui lui ont permis d'assurer un confort minimal sous les conditions difficiles d'un climat tempéré.

L'homme a toujours construit pour s'abriter des aléas du climat. Nous pourrons à priori retenir quatre raisons essentielles qui ont poussé l'homme à construire:
.Sociale
.Symbolique
.Fonctionnelle
.Artistique

Mais il faut noter que l'objectif primaire de l'homme, à travers la construction, reste celui de "modifier le climat ". D'où le concept du "bâtiment comme élément modificateur du climat ".

Le confort thermique…

Un peu d'histoire…

Le confort est une notion étroitement liée à la sensation de bien-être et qui ne possède pas de définition absolue.

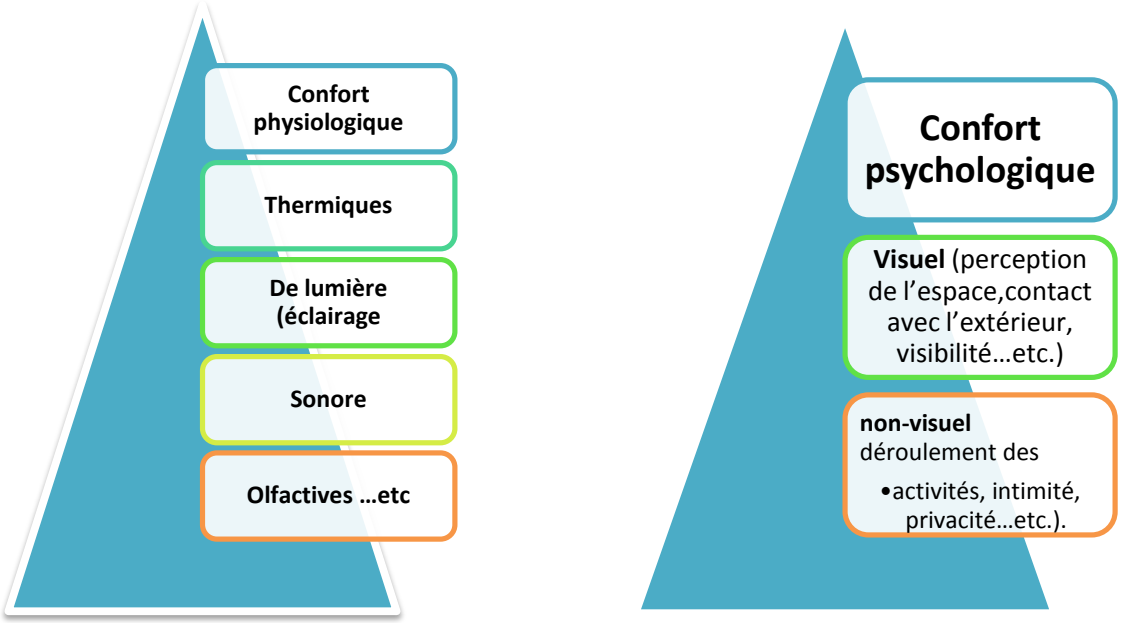
Le terme « Confort » ne fut introduit en France qu'au XIX et était très lié aux classes sociales de l'époque (noblesse, bourgeoisie, ouvrière).

Malgré qu'on puisse affirmer que le premier confort atteint par l'humanité a été certainement la possibilité de disposer d'un endroit clos et couvert (un vrai abri), la notion de confort demeure plus vaste et ne peut se limiter aux seules conditions physiques qui déterminent le confort de type hygrothermique (température, humidité…etc.), sonore ou olfactif.

Egalement les conditions de confort ne sont pas figées dans le temps et dans l'espace. Bien au contraire, elles varient:
Socialement (selon le niveau de vie et les classes), Géographiquement (selon les régions) et Historiquement (selon les périodes).

Donc, loin d'être une valeur immanente le confort est une construction culturelle qui s'élabore et se transforme selon les mythes et les valeurs dominantes de la culture dans laquelle il se déploie.

*** De quel confort peut-il s'agir en construction?**



-Histogramme de pyramides (I.1) : confort de batiments.

I.5-La terre renforcée, un matériau de construction:

Construire aujourd'hui des ouvrages et des bâtiments avec des matériaux à base de terre crue nécessite de ces derniers des performances mécaniques et thermiques remarquables. Pour atteindre ces performances, le traitement des sols aux fibres végétales est l'une des techniques utilisées pour améliorer certaines caractéristiques et la durabilité de ces matériaux.
De ce fait, la connaissance de quelques notions de bases sur la physico-chimie des argiles et des fibres végétales permet de mettre en évidence le rôle des interactions pouvant être existées.
Dans ce chapitre, nous définissons dans un premier temps les argiles, représentant la fraction très fine des sols et les fibres végétales.

1.Les argiles.

Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles (*Grunberger, 1995*)[7]. Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (il s'agit généralement de silicates d'aluminium, mais parfois de silicates de magnésium), dont la structure feuilletée les a fait ranger dans la famille des phyllosilicates. Selon la famille de minéral argileux considérée, les particules les plus fines peuvent être constituées d'un feuillet ou d'un assemblage de quelques feuillets, et leur taille est très faible, de l'ordre de 2 à 5 µm ; ces dimensions sont caractéristiques des particules argileuses et ne se retrouvent pas dans d'autres minéraux.
Avant d'entrer dans les détails de la minéralogie des argiles, il nous semble utile de rappeler la terminologie associée pour éviter toute confusion : un terme donné est parfois utilisé pour désigner plusieurs niveaux structuraux différents, et deux termes différents sont parfois employés pour désigner le même niveau. On distingue 4 niveaux d'organisation :
- **les plans** sont constitués par les atomes ;
- **les couches,** tétraédriques ou octaédriques, sont formés par une combinaison de plans ;
- **les feuillets** correspondent à des combinaisons des couches ;
- **le cristal** résulte de l'empilement de plusieurs feuillets.

La cellule de base des minéraux argileux est appelée cristallite. Elle est constituée d'un feuillet et d'un inter-feuillet appelé aussi espace inter-foliaire. L'inter-feuillet est rempli de fluide (d'eau) assurant une liaison électrochimique entre les feuillets. Il existe différents types de liaisons inter-feuillet, dues notamment à des phénomènes de substitutions iso-morphiques à la surface des cristallites.
Des différentes possibilités d'empilement des couches dans les feuillets, de substitutions isomorphiques, de liaisons inter-feuillet et enfin d'arrangement spatial des cristallites résulte la grande diversité de structures et de propriétés des argiles.

1.1. Microstructure des argiles

De tous les éléments chimiques qui composent l'écorce terrestre le silicium Si, l'oxygène O et l'hydrogène H, (en général sous forme d'eau H_2O, d'oxyde de silicium, ..) font partie de ceux qui sont les plus abondants. On peut noter aussi (l'aluminium Al, le fer Fe,….). Le Si a un nombre atomique Z=14, c'est dire que si l'on repartit ses électrons, conformément à la règle de remplissage des couches de Klékovski, et d'après le tableau périodique de Mendeleiev, on s'aperçoit que le Si a quatre électrons sur sa dernière couche. Pour acquérir la configuration des gaz rares, il doit perdre ses quatre électrons célibataires, c'est la raison pour laquelle Si est souvent sous forme Si^{4+}, mais il ne peut pas rester sous cette forme ionique sans attirer la convoitise des nucléophiles. Ainsi, on assiste à une compétition, et l'hydroxyde OH^- qui est l'un des plus forts nucléophiles et l'un des plus abondants dans la nature l'emporte. On assiste alors à une formation massive de $Si(OH)_4$ tétraédrique : Lorsque deux $Si(OH)_4$ se rencontrent, on a des liaisons hydrogènes qui s'établissent entre l'oxygène d'une des molécules et l'hydrogène de l'autre molécule, il en résulte une déshydration, c'est-à-dire l'expulsion d'une molécule d'eau H_2O, les deux molécules vont alors avoir un atome d'oxygène en commun.

Les plans

- Lorsque cette opération se répète à l'infini dans le plan, alors on obtient un plan Hexagonal de d'oxyde de silicium (SiOm) n. En effet, on a des tétraèdres dont les bases sont liées de sorte que si elles sont projetées sur un plan, elles forment des hexagones dont les sommets sont occupés exclusivement par des ions O^{2-} et leur centre par du Si^{4+} qui cimente la structure.
- Il existe aussi le plan compact ou assemblage compact: Cet assemblage est valable pour les ions oxygènes (O^{2-}). Hydroxyles (OH^-), Fluor (F^-). On peut considérer que les atomes ont la forme d'une sphère et sont au contact dans des plans successifs. Ils sont disposés de sorte que les centres des sphères se situent sur des droites parallèles entre elles. Les sphères appartenant à deux rangs contigus sont décalées d'un rayon, si bien que les centres de deux sphères appartenant à une ligne et une sphère placée sur une ligne voisine sont situés aux sommets d'un triangle équilatéral. (Figure 2.1).

  - ***REMARQUE :*** Le plan hexagonal constitué seulement de O^{2-} peut s'obtenir à partir du plan compact, simplement en retirant une sphère sur deux sur les deux rangs. On aura en effet des cavités limitées chacune par six sphères d'où l'appellation de plan hexagonal.

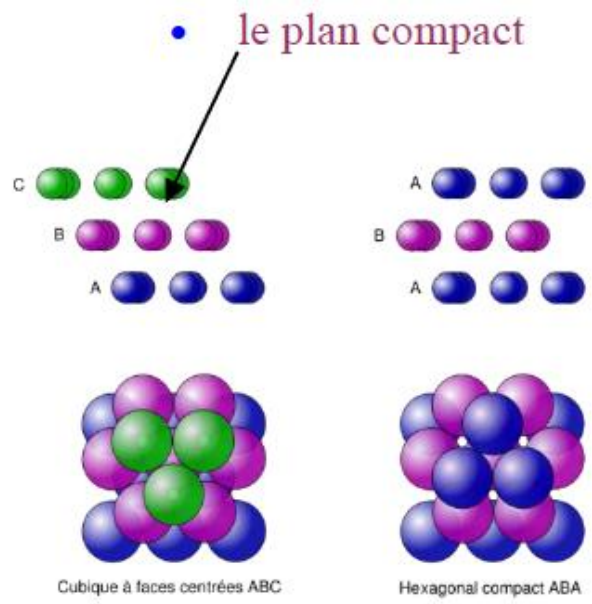


Figure (I.13): Les deux empilements compacts.

Les Couches

- Couche tétraédrique

Lorsqu'un plan compact s'associe avec un plan hexagonal de sorte les plans se 'collent' face à face, alors on obtient une couche tétraédrique notée couche T. Son épaisseur est de 4,6 A° (Figure I.14).

- Couche octaédrique

Lorsque c'est deux plans compacts qui s'associent de la même manière face à face, alors on obtient une couche octaédrique notée couche O. Son épaisseur est de 5,05 A° (FigureI.14).

Figure(I.14): Structures de base d'un feuillet d'argile: (a) le tétraèdre de silicium et (b) l'octaèdre d'aluminium

Les Feuillets

- **Feuillet TO ou 1/1**

Lorsqu'une couche octaédrique s'associe à une couche tétraédrique alors on obtient le feuillet de type 1/1 ou TO formé d'une couche tétraédrique T et d'une couche octaédrique O (Figure 2.3). Ces argiles, dont l'unité structurale de base est dissymétrique, sont représentées par le groupe des kaolinites et des serpentites, ces dernières étant beaucoup plus rares.

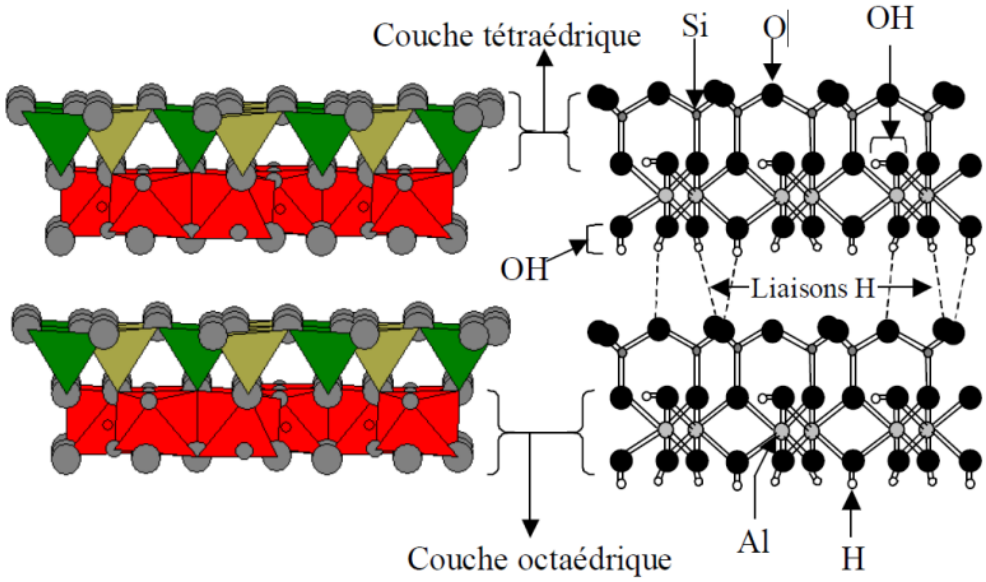


Figure (I.15): Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite). (Konan, 2006).[8]

- **Feuillet TOT ou 2/1**

Lorsque la couche tétraédrique est prise en sandwich entre deux couches octaédriques alors on a un feuillet de type 2/1 ou TOT (Figure 2.4). Ces argiles, qui présentent une unité structurale de base symétrique, comportent de nombreux groupes (illites, smectites, chlorites) dont la structure et les propriétés sont très variables. Dans chacun des deux feuillets décrits précédemment, le cation peut être remplacé par un cation de taille voisine (pour « tenir » dans le site octaédrique ou tétraédrique), mais pas nécessairement de même valence. On parle de substitution isomorphe car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Ces substitutions entraînent alors un excès de charges négatives à la surface des feuillets. Cette électronégativité des feuillets est une des caractéristiques fondamentales des argiles. L'électro neutralité est obtenue par adsorption de cations compensateurs à la surfaces des feuillets (K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{2+}...) provenant du fluide.

Par ailleurs, les bords des cristallites possèdent aussi des charges localisées car ils correspondent à des ruptures de liaisons. La charge des tranches de cristallites dépend alors du pH (*Grunberger, 1995*): elle est négative en milieu basique, et positive en milieu acide (en raison de la fixation de protons H^+ sur des ions O^{2-} présents sur ces bords).

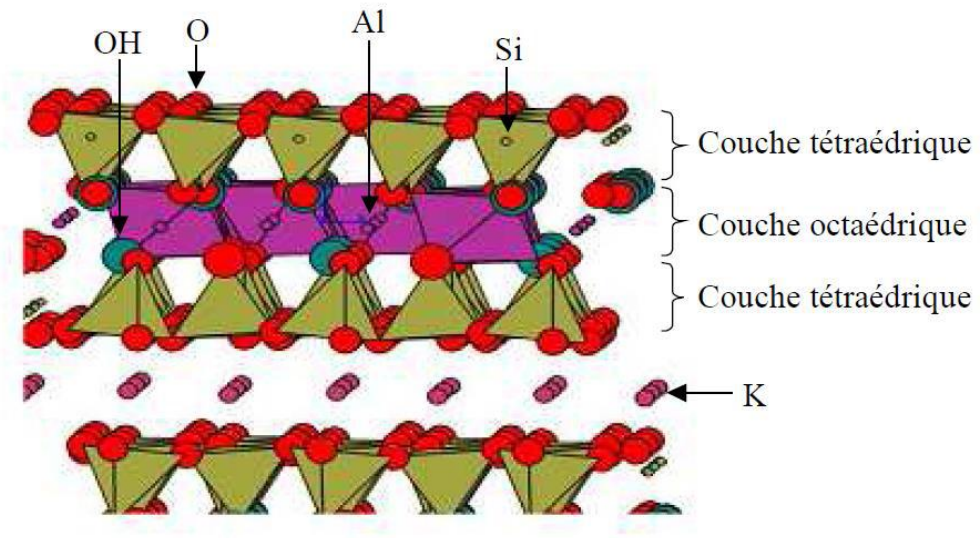


Figure (I.16): Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre Alumineux (cas d'une illite). (Konan, 2006).

1.2. Classification des argiles

Au sein même d'une couche ou entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons inter atomiques sont des liaisons de valence primaire très fortes. Entre deux feuillets successifs, ces liaisons sont en général 10 à 100 fois moins fortes que les précédentes en raison des cations adsorbés: il s'agit de liaisons hydrogène et de forces d'attraction électrostatiques et de Van der Waals. On sait que la molécule d'eau, à cause de sa dissymétrie, agit comme un dipôle électrique : le centre de gravité des charges négatives est différent de celui des charges positives. Les cations en solution sont entourés de molécules d'eau «captives » avec lesquels ils ont des liaisons ion-dipôle : on parle de sphère d'hydratation ou de solvatation (Figure 2.5).

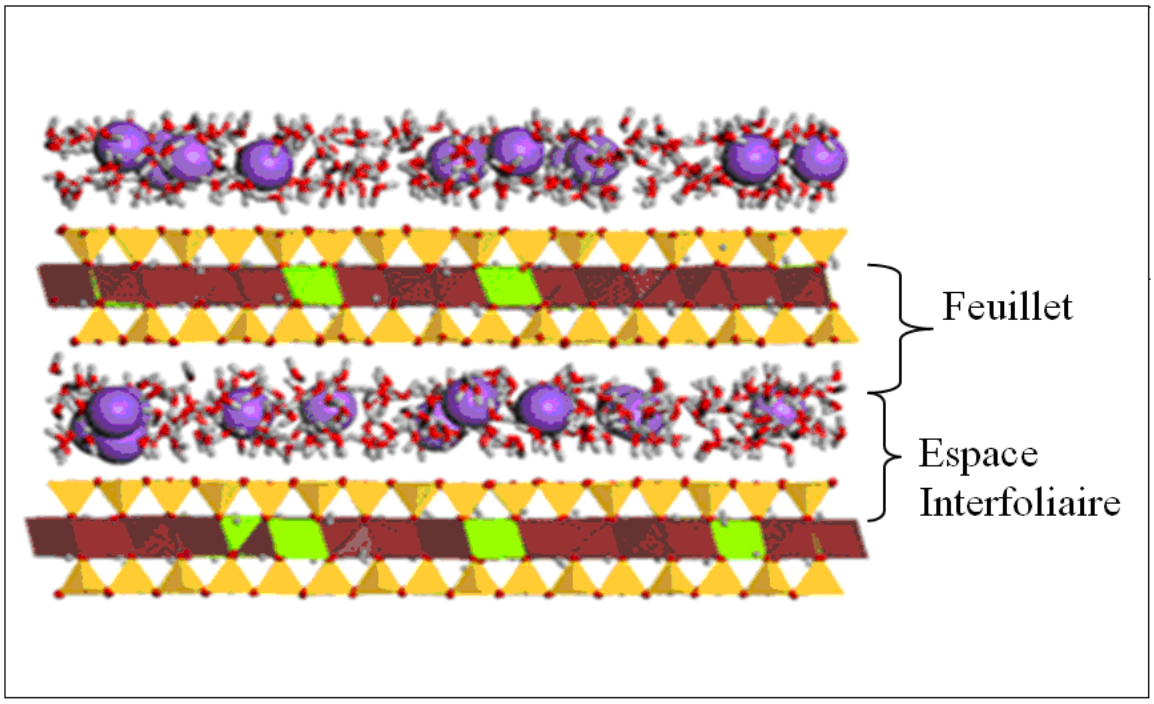


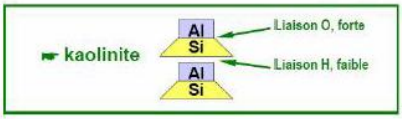
Figure (I.17) : Sphère de solvatation dans l'espace Inter foliaire d'une Montmorillonite.

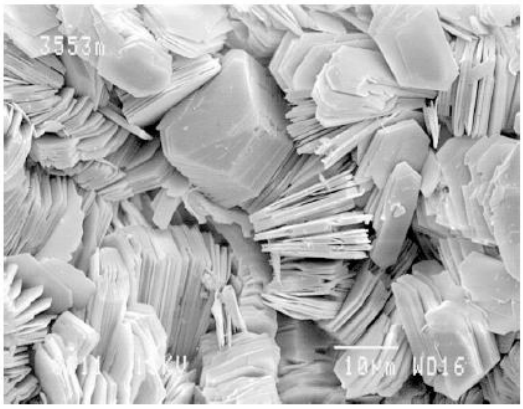
Les cations adsorbés à la surface des feuillets peuvent l'être d'au moins trois façons différentes (*Charlet et Schlegel, 1999*). Lors des substitutions au sein d'un feuillet, la charge est délocalisée au niveau d'atomes superficiels, créant de véritables sites d'attraction des cations à la surface, sous forme de cavités. Un grand nombre de cations, entourés de leurs sphères d'hydratation, sont attirés par la surface chargée négativement, en raison des seules forces électrostatiques, et restent à proximité de cette surface: on parle alors de couche diffuse. Lorsqu'un cation s'approche de la surface, il peut aussi être littéralement capté par ces sites de surface. Dans certains cas, le cation reste entouré de molécules d'eau d'hydratation et vient s'accoler à la surface, par des liaisons hydrogènes et, essentiellement, électrostatiques ; on dit qu'il forme un complexe de sphère externe, ou complexe hors sphère
(CHS). Les forces d'attraction mises en jeu diminuent rapidement avec la distance, donc un assemblage est d'autant plus stable (donc d'autant mieux lié) que la distance entre charges positive et négative est faible. Ainsi, lorsque le cation compensateur a des dimensions proches de celles des cavités de surface, l'excès de charge négative de la surface provoque la déshydratation du cation compensateur qui vient ensuite s'enchaîner à l'interface entre les feuillets, formant ce qu'on appelle un complexe de sphère interne (CSI). Un CSI est évidemment plus stable qu'un CHS, lui même plus stable qu'une liaison purement électrostatique de couche diffuse.
Les principaux critères de classification sont basés sur les paramètres suivants:
- la combinaison de feuillets (TO ou 1/1 ex : kaolinite; TOT ou 2/1 ex: illite T/O/T/O ou 2/1/1ex : chlorite)
- le type de cations dans l'octaèdre.

- la charge de la couche ;
- le type de matériel dans l'espace inter-foliaire (cations, molécules d'eau,...).

1.2.1. Famille des Kaolinites

Dans la famille des argiles 1/1, (Figure 2.6) on distingue le groupe des kaolinites et celui des serpentinites (beaucoup plus rares, et dont nous ne parlerons pas). Dans les kaolinites, il y a en fait très peu de substitutions isomorphes, et la liaison face-à-face entre feuillets est assurée par des liaisons Hydrogène entre les atomes d'oxygène de la base de la couche T et les atomes d'hydrogène du groupement hydroxyle de la couche O du feuillet suivant, et bien sûr par des liaisons de Van der Waals. Ces liaisons sont suffisamment fortes pour empêcher l'adsorption d'eau interfoliaire. Une particule de kaolinite est formée d'un empilement de plusieurs feuillets ayant chacun une épaisseur d'environ 0,7 nm**.**



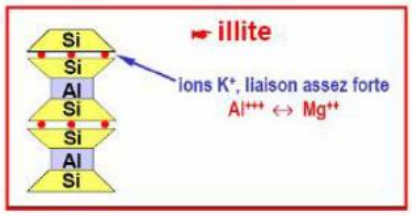


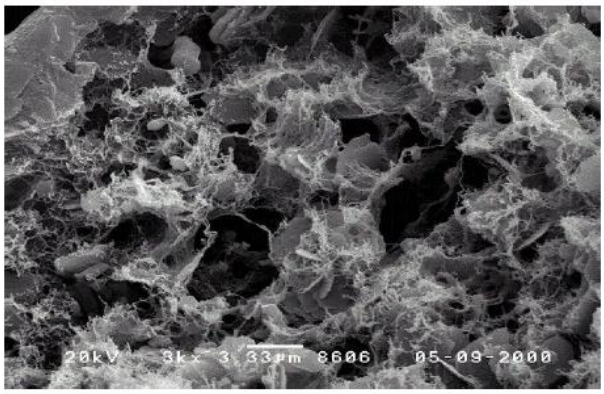
Exemple d'espace poreux : image MEB d'une argile de type kaolinite (photo de N. Liewig et P. Karcher), (Comparo 2004)

Figure (I.18) : Morphologie et structure schématique de la kaolinite.

1.2.2. Famille des Illites

Les argiles 2 /1 comportent de nombreux groupes, en raison des différentes liaisons possibles entre deux feuillets successifs, liaisons assurées par les cations compensateurs (Figure 2.7) : Dans le cas des illites, le cation compensateur est l'ion potassium K_+ qui forme un CSI avec les deux feuillets entre lesquels il se trouve, c'est-à-dire que le potassium a le même diamètre que l'espace inter-foliaire, cette liaison des feuillets par le potassium anhydre est si forte que les molécules d'eau ne parviennent pas à s'engager entre les feuillets.





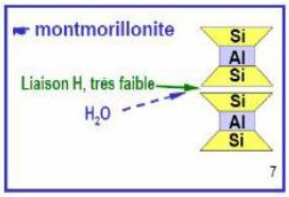
Picture size 33 µ-m this picture from the weatherford laboratories

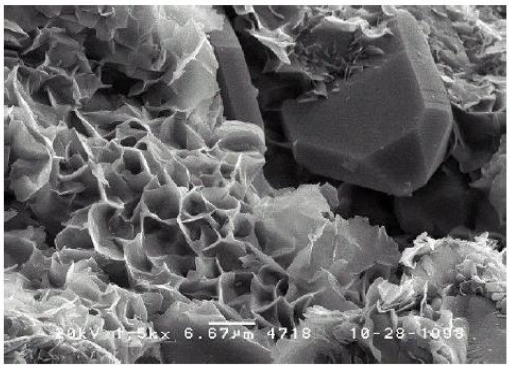
Figure (I.19): Forme conventionnelle l'illite.

1.2.3. Famille des Smectites

Il s'agit de la famille la plus diversifiée des minéraux 2/1. La montmorillonite est l'un des principaux sous groupes de cette famille (Figure 2.8). La montmorillonite est un minéral composé de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté de formule $(Na,Ca)0,3(Al,Mg)2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$. Elle résulte de l'empilement des deux couches de base. Les cations compensateurs des montmorillonites sont le sodium Na^+, le calcium Ca^+ et, en plus petite quantité le magnésium Mg^{2+}. Na^+ et C^{a+} restent entourés de molécules d'eau d'hydratation et viennent s'accoler à la surface, par des liaisons hydrogènes et, essentiellement, électrostatiques, assurant ainsi une liaison inter-feuillet plus faible, ce qui autorise l'adsorption de cations hydratés supplémentaires, et notamment de molécules d'eau, par attraction électrostatique. Plusieurs couches d'eau peuvent ainsi être adsorbées entre les feuillets. Ainsi la montmorillonite possède les propriétés de gonflement les plus importantes des phyllosilicates.

Figure (I.20) : Forme conventionnelle Montmorillonite.

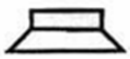
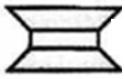
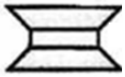




Picture size 67 µ-m this picture from the weatherford laboratories

Le tableau (I.1) résume ces 3 configurations avec leurs formules chimiques.

Tableau (I.1): Résumé des différents types des argiles.

Type de l'argile	Combinaison des feuillets	Formule chimique	Type d'élément dans l'espace interfoliaire
Kaolinite	Feuillet 1/1 	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Liaison hydrogène fort
Illite	Feuillet 2/1 	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$	Présence de K^+. ce dernier a le même diamètre que l'espace interfoliaire
Montmorillonite (famille des smectites)	Feuillet 2/1 	$(Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Présence de Na^+ et Ca^+ Hydrate ou non

1.2.4. La charge des argiles

Une particule d'argile est généralement chargée négativement. La capacité d'échange cationique (CEC) ou anionique (AEC) représente la charge (sous forme d'ions attirés à la surface de l'argile) nécessaire pour arriver à l'électro-neutralité. On peut dire que la particule d'argile est généralement chargée négativement et ceci pour trois raisons principales (*Beddiar. A, 2001*).

1. Les imperfections du réseau cristallin de la particule. Ces imperfections provoquent des remplacements iso-morphiques à l'intérieur du réseau. Ceci conduit à un déficit de charge qui apparaît sous forme de charge négative portée par le réseau.
2. L'ionisation de groupes chimiques présents à la surface de la particule. Dans le cas des argiles, ces groupes sont des groupes hydroxyle. La charge dépend de l'importance de l'ionisation et donc du pH.
3. L'adsorption préférentielle de certains ions contenus dans la solution. Ces adsorptions se produisent sur des sites ou les valences des atomes du réseau ne sont pas toujours compensées. Ce phénomène dépend évidemment entièrement de la nature des ions dans la phase aqueuse qui sont susceptibles de s'adsorber.

2.Les fibres.

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

2.1. Stabilisation par fibres

La stabilisation par armature a l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connait aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimes et en pise (Houben, 2006). Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement (Estabragh,2011 ; Prabakar,2002).

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

2.2 Différents types de fibres

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

a. Les fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1.35) (Baley, 2013) :

Les fibres végétales :

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouches pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres
vis-à-vis des émissions de CO_2 et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales comprennent :

- des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (Lin, chanvre, jute, ortie),

• les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco);

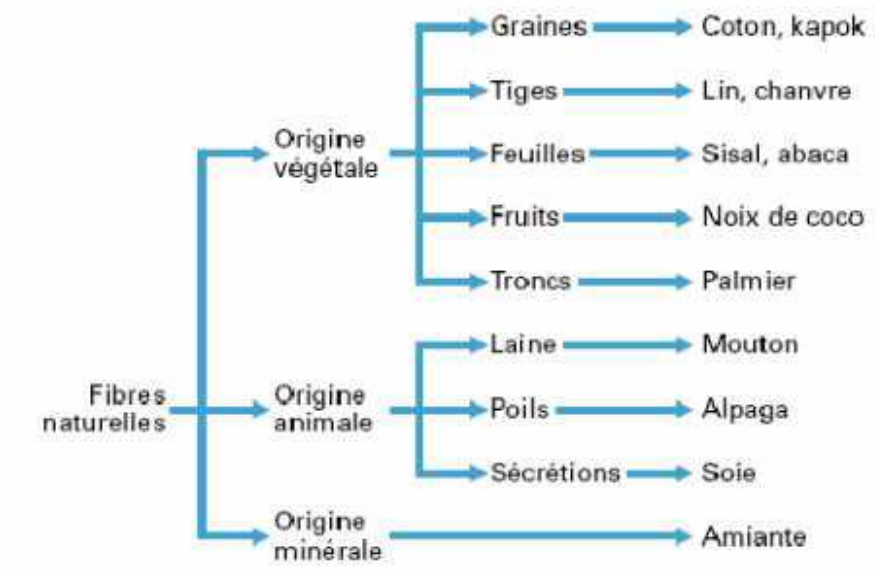


Figure (I.21) : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013).

Les fibres animales :

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

• Poils: la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire,…

• Sécrétions: soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée;

Les fibres minérales :

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérigènes qu'elle présente (Service,2004).

b. Fibres synthétiques

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

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

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont:

- Les polyamides (Nylons);
- Les polyesters;
- Les dérivés polyvinyliques;
- Les polyoléfines: les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques (Quinn, 2002).

c. Fibres artificielles :

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

CHAPITRE II

méthode et matériels

I-Matériaux :

-La terre :

1. Définition :

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques.

La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre (Houben, 1996).

2. Composition :

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 µm-0.08 mm), et les argiles (< 2 µm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée 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 constituants 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)[9].

Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication de l'Adobe, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

3.Définition :

Il n'y a pas de définition universelle du terme «argile » En effet, il en existe autant que de disciplines. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique.

L'argile a l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllo-silicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite…), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferrifères (lepidocrocite, maghemite…).

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

3.1 Composition chimique :

Les analyses sont effectuées sur des échantillons d'argile d'Adrar Nord.[10]

Les principaux résultats des analyses chimiques réalisées sont regroupés dans le tableau (II-1) suivant :

Tableau II .1 : L'analyse chimique d argile du gisement Adrar Nord

Éléments	Argile dispersée %	Argile sableuses %
SiO2	62,86	75,24
Na2O	0,58	0,27
K2O	3,52	2,51
Al2O3	15,17	10,05
Fe2O3	7,24	4,43
CaO	0,99	0,85
MgO	1,65	0,95
Cl	0,309	-
F	0,05	-
PF	5,90	3,82

- identification de sol :

Dans cette partie on va explorer l'argile comme matière premier dans la construction. Et pour l'identifié « limite d'Atterbeg et l'essai au bleu méthylène » sont des étapes clé a fin de savoir ces propriétés.

1-Limite d'Atterbeg :

Les limites Wl, Wp séparent les différents états d'un sol fin (liquide, plastique, solide) suivant leur teneur en eau.

-la limite de liquidité Wl :

Elle sépare l'état liquide de l'état plastique. Pour la déterminer, on utilise la boite de Casagrande avec une coupelle lisse (le matériau est plutôt l'argile). Voir figure(II.2)

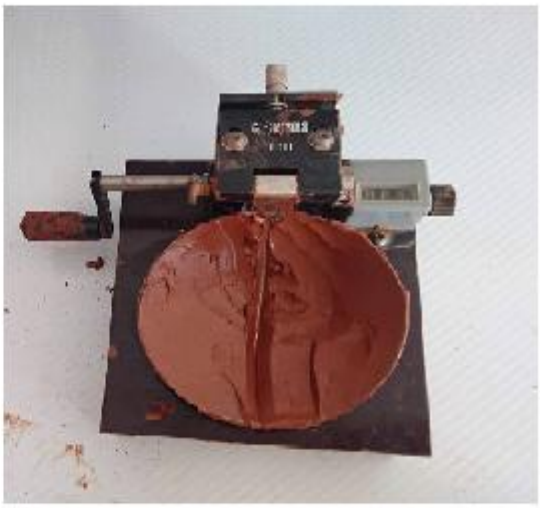


Figure (II.1) : limite d'Atterbeg.

Tableau(II.2) : Résultats de la limite de liquidité.

essai	I	II	III
N° de la tare	B4	B6	B1
Nombre de coup	19	23	31
Poids total humide (g)	43.3	32.8	31.2
Poids total sec (g)	36.9	27.5	26.4
Poids de la tare (g)	36.9	27.5	26.4
Poids de l'eau (g)	36.9	27.5	26.4
Poids sec d'échantillon (g)	9.9	9	10.9
Teneur en eau (%)	64.64	58.88	44.03
Teneur en eau Moyenne en (%)		55.85	

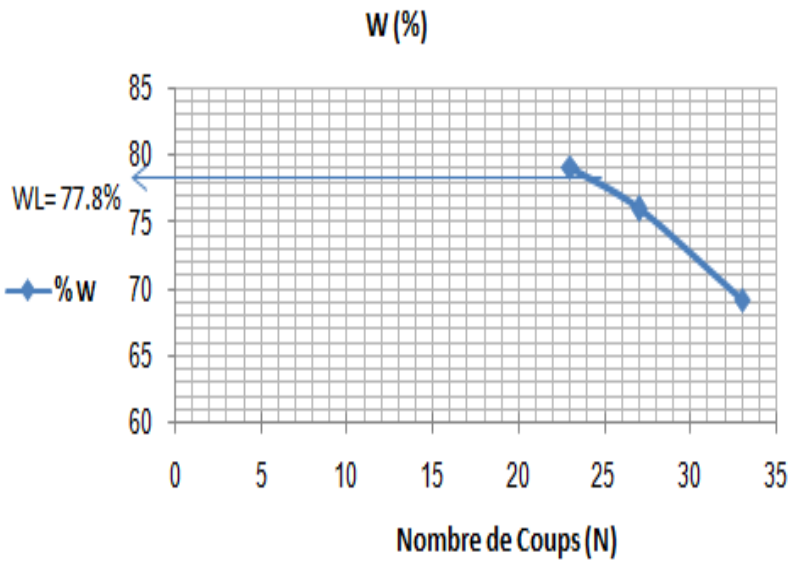


Figure (II-2): Courbe de la limite de liquidité.

-Pour notre matériaux la limite de liquidité est Wl= 77.8%

-Détermination de la limite de plasticité :

Elle sépare l'état plastique de l'état semi-solide. Pour l'obtenir on roule la pate jusqu'à la formation d'un fuseau de diamètre 3mm. La limite de plasticité Wp est le teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçon de (1 à 2) cm de longueur.

Figure (II-3): Mode opératoire de l'essai de la limite de plasticité.

Tableau (II.3) : Résultats des essais pour la détermination de la limite de la plasticité.

essai	I	II	III	IV
N° de la tare	E	F	G	H
Poids total humide (g)	19.2	19.4	28.6	28.6
Poids total sec (g)	18.7	18.6	28.2	17.9
Poids de la tare (g)	17.5	16.6	27	15.6
Poids de l'eau (g)	0.5	0.8	0.4	0.7
Poids sec d'échantillon (g)	1.2	2	1.2	2.3
Teneur en eau (%)	42	40	33.33	30.43
Wp (%)	36.44			

La limite de plasticité Wp = 36.44%

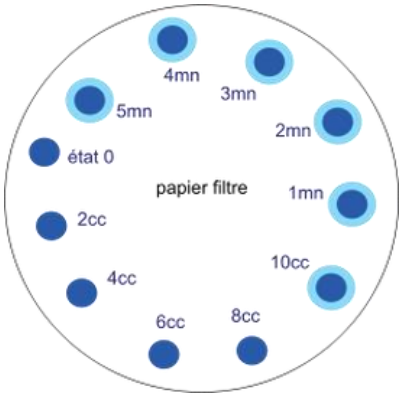
- Indice de plasticité :

Il définit l'étendue du domaine plastique, il est exprimé par la relation :

Ip= Wl-Wp → Ip = 77.8 - **36.44** → Ip=41.36 %

2- Essai au bleu méthylène :

2.1-Objectif et principe de l'essai.



L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.
L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.
L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène fixée par 100 g de la fraction granulaire de sol analysé.

2.2-Propreté.

Lorsque l'on frotte des granulats non lavés dans la main (du sableux des gravillons), on peut constater des traces de poussière sur les doigts. Il s'agit de particules argileuses de petites dimensions. Celles-ci sont susceptibles d'être nuisibles à la qualité du mélange ou de la pâte que l'on veut obtenir à partir du granulat, comme du béton ou un mélange bitumineux. Dans les sols, les particules argileuses vont avoir une incidence sur le comportement du sol en présence d'eau.

- Dans le domaine du béton, ces particules perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.
- Dans les mélanges bitumineux, comme les enrobés bitumineux ou les enduits superficiels, un défaut de propreté peut conduire également à une perte d'adhérence du granulat avec le liant et donc à un dés enrobage.

2.3-Matériel (essai manuel)

L'appareillage à utiliser est le suivant :

1- Burette

2- Papier-filtre

3- Tige de verre

4- Agitateur à ailettes.

5- Balance

6- Chronomètre

7- Tamis.

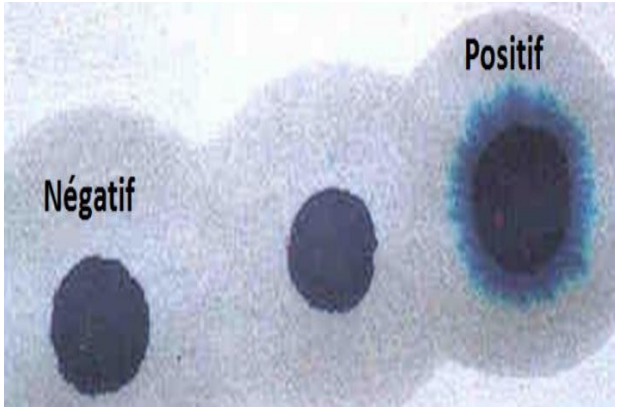
8- Eau distillée + pissette.

9- Bécher d'une capacité d'environ 1 l à 2 l

10- Bleu de méthylène

Figure II.4- matériels utilisés.

*Il est également possible de réaliser l'essai de façon automatique à l'aide d'un appareil qui combine méthode turbidimétrique et mesure par un colorimètre. Cet appareil permet d'analyser les sables sur la fraction granulaire 0/4mm ainsi que sur les fillers ou les sols.



2.4-Mode opératoire

a- Prendre 10g de sol sec passé au tamis 5mm.
b- Mettre la prise d'essai à trempe dans un bécher avec 100cm³ d'eau.
c- A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), disperser la suspension pendant 5 min.
d- A l'aide du dispositif de dosage, introduire 5cm³ de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1min.

*Le test de la tache :

A l'aide d'une baguette, déposé une goutte de la suspension sur le papier filtre.

Test négatif : on dira que le test de la tache est négatif si la tache déposée sur le papier filtre est sans auréole. Dans ce cas, ajouter
5cm³ de bleu, laissé agiter pendant 1min.
Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire
(Tant que le test de la tache restera négatif).

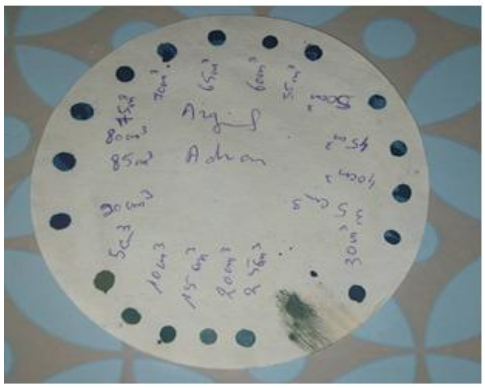


Figure II.5 : test négatif

Test positif : on dira que le test est positif si la tache déposée sur le papier filtre forme une auréole. Dans ce cas, procédé sur le papier filtre à 5 tests successif de la tache (à raison d'un test par minute)
Sans ajouter de bleu. Si les 5 tests s'avèrent positif, l'essai est terminé.
Si l'IIème, IIIème ou IVème test de la tache devient négatif

Figure II.6 : test positif

(La tache devient sans auréole), ajouter uniquement 2.5cm³ et reprendre les tests de la tache de départ jusqu'à ce que les 5 tests de la tache soient positif.

Remarque :

Pendant tout le déroulement de l'essai, l'agitation n'est jamais interrompue

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

$$VBS = V/m$$

Avec :

V : volume de bleu ajouté en cm³.

m : la prise d'essai.

V= 105cm³

m=10g

$$VBS = 105/10 \rightarrow VBS = 10.5\ cm^3/g$$

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par :

$$SST\ (m^2/g) = 20.93 * VBS$$

$$SST = 219.765\ (m^2/g).$$

Tableau II.4 : classification du sol selon VBS

Valeur de bleu du sol	Nature de sol
<0.2	**Sols sableux**
0.2-2.5	**Sols limoneux**
2.5-6	**Sols limoneux-argileux**
6-8	**Sols argileux**
>8	**Sols très argileux**

Conclusion :

D'après le tableau précédent on constate que notre sol est très argileux.

Résumé :

On choisit de méthode d'indentification de sol :

-L'essai bleu méthylène au quel a permet de préciser la nature de sol VBS= 10.5 cm^3/g

-les limites d'Atterbeg : Wl, Wp, Ip.

Wl=77.8 %

Wp=36.44%

Ip=41.36%

Donc ce matériau est un sol très argileux plastique.

-Analyse chimique d'eau :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة الموارد المائية
MINISTÈRE DES RESSOURCES EN EAU
الوكالة الوطنية للموارد المائية
AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES
Créée par décret N° 81 / 167 du 25 juillet 1981 - Compte Trésorerie d'Alger N° 0019800065 clé 59
ANRH
Antenne Régionale Sud Ouest
الفرع الجهوي للجنوب الغربي

Demandeur : ETUDIENT
Analyse demandée : A.F
Date de réception : 08/03/2015
N° de laboratoire : 3096
Designation : TILLILENE F 02

RESULTATS D'ANALYSES

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	RESULTATS	NORMES DE POTABILITE	MINERALISATION GLOBALE	RESULTATS	NORMES DE POTABILITE
PH	7,28	≥ 6,5 et ≤ 9	Calcium Ca++ mg/l	62	200,00
Conductivité ms/cm	1,20	2,80	Magnes. Mg++ mg/l	36	150,00
Turbidité eau brute NTU	-	5,00	Sodium Na + mg/l	130	200,00
Turbidité eau déc. NTU	-		Potass. k+ mg/l	11	12,00
Residu sec à 110° C mg/l	760,00	1500,00	Chlorure Cl- mg/l	180	500,00
Temperature °C	-	25,00	Sulfate SO4-- mg/l	250	400,00
PARAMETRES DE POLLUTION	RESULTATS		Bicarbon. HCO3- mg/l	131	-
			Carbonate CO3-- mg/l	0	-
Oxygène Dissous mg/l	-		Silice SiO2 mg/l	8,00	-
Ammonium NH4+ mg/l	0,025	0,50	TH °F	30	-
Nitrite NO2- mg/l	0,000	0,20	TAC °F	11	-
Nitrate NO3- mg/l	18,00	50,00	TA °F	0	-
O.phosphate PO4- mg/l	0,040	0,50	Minéralisation mg/l	744	-
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	3,50	5,00	Somme des ions mg/l	818	-
Fer mg/l	-	0,30	F- mg/l	-	-

INTERPRETATION :

Eau minéralisée de bonne qualité physico-chimique

Figure (II.7) : Résultats d'analyse chimique d'eau.

- Définitions générale :

Une fibre végétale : est une expansion cellulaire filiforme et morte, principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines, et de pectines. Elle est isolée ou compose avec d'autres un faisceau.
Les fibres végétales peuvent permettre aux industriels des matériaux de réduire leur dépendance vis-à-vis du pétrole, grâce à leurs propriétés mécaniques, leur faible densité, leur résistance thermique, leur absorption phonique, leurs propriétés de surface, et leur biodégradabilité.

La paille : est la partie de la tige de certaines graminées, dites céréales à paille (blé, orge, avoine, seigle, riz), coupée lors de la moisson.

Figure (II.8) : Paille

-L'alfa (de l'arabe halfa) : stipe tenace ou sparte est une plante herbacée vivace de la famille des poacées, originaire des régions arides de l'ouest du bassin de la Méditerranée, qui sert notamment à fabriquer des papiers d'impression de qualité.
Par extension, le terme désigne aussi le papier fabriqué à partir de cette plante.
Nom scientifique : Macrochloa
.

Figure (II.9) : Hafla.

***-Noyau de datte* :** est un corps solide occupe le centre du fruit, et forment une forme rectangulaire côtés brun, et il a beaucoup de noms varient selon les régions, et la semence représente une partie est consommée et à un taux de 4% à 20% du poids total du fruit par catégorie, a été ce pourcentage est affecté par la source des opérations de pollen et agricoles.

Figure (II.10)- Noyau de datte.

Régime de palmier (grappe) :

En botanique, la grappe (de l'ancien français crape, « agrafe », de l'ancien bas francique *krappa, « crochet »), est une inflorescence simple, c'est-à-dire un ensemble de datte disposées selon un certain ordre sur un axe commun.

Figure(II.11) : Régime de palmier

-Préparation de l'échantillon (adobe) :

Dans la préparation des échantillons, celle de l'essai de la compression. Je me suis servi d'un moule cubique de (9*9*9).

*Pour chaque type de fibres (Halfa, Paille, noyaux de datte, Régime de datte) on a utilisé :

*Pour 3 % de fibres végétale:
-22 % d'argile.
-75 % de sable.
-3 litres d'eau.

*Pour 5 % de fibres.
-22 % d'argile.
-75 % de sable.
-3 litres d'eau.

*Mélangé le tous jusqu'à obtenir une pate homogène.

Figure (II.12): matériaux utilisés pour préparer l'adobe.

*Pour l'Halfa, Paille et Régime de dattes on les a dimensionnés de 4 cm.

Figure (II.13) : dimension de fibre 4cm.

*Après avoir une pate homogène, on l'a met dans un moule cubique de (9*9*9) cm.

*laisser sécher a l'air libre pendant 14jours

Figure (II.14) : moule de (9*9*9) cm

Figure(II.15) : échantillon obtenus après le démoulage.

Note : j'ai suivi la même procédure pour la préparation des échantillons de l'essai thermique sauf que j'ai utilisé un moule adaptant à l'appareil de dimension (30*30*4) cm.

*Après avoir une pate homogène, on l'a met dans un moule cubique de (30*30*4) cm

*laisser sécher a l'air libre pendant 14jours.

Figure (II.16) : moule de (30*30*4) cm

Figure(II.17) : échantillon obtenus après le démoulage.

II-Matériels :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée ;

comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.

Parmi ces essai celle de la compression.

II.1-Essai de compression :

Description : Essai de résistance « uniaxial » sur des éprouvettes de forme géométrique simple: cylindre ou parallélépipède (barre ou cube). On charge à vitesse constante jusqu'à obtenir la rupture de l'éprouvette.

Principe de l'essai :

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique, cubique ou une carotte à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle ci afin de déterminer sa résistance à la compression.

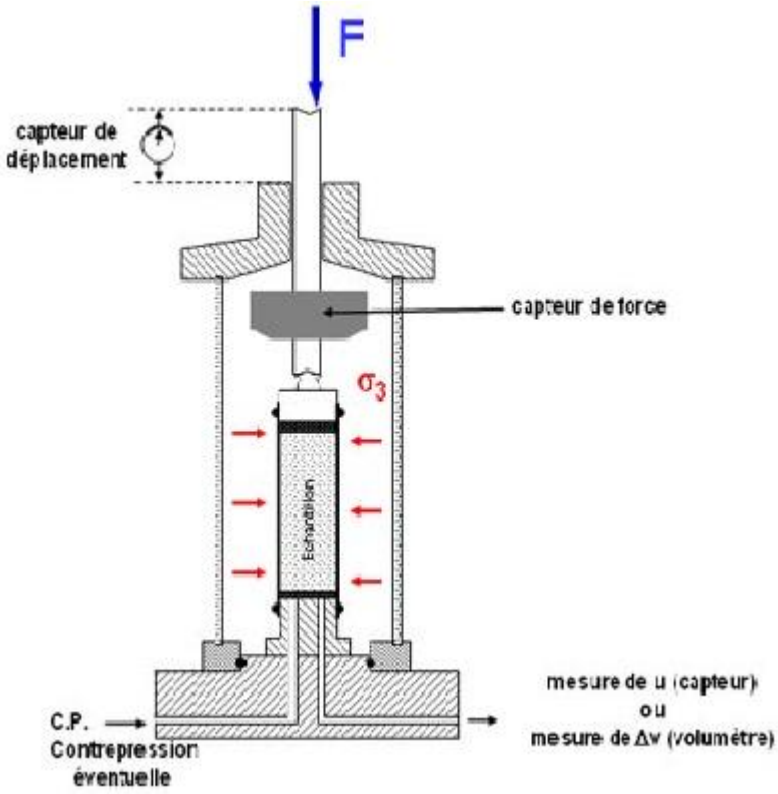


Figure (II.18) : l'appareil de compression [10]

II.2- l'essai thermique :

Description de l'appareille H112N :

- A fin de réaliser l'essai on a utilise l'appareille de mesure la conductivité thermique des matériaux solides (Apparatus.P.A. Hillton Ltd England).

Figure (II-19) : Version H112N.[12]

Le dispositif se compose d'un essai de chambre dimensions de l'échantillon <30 mm X 30 mm> Hauteur et variable en fonction de l'échantillon. Ne pas dépasser 75 mm.
Représenter plaque inférieure froide de la plaque et la capacité thermique comprise entre l'élément chauffant 20 W / min à 500 watts / min et reliée à la plaque de la partie supérieure de la tige filetée se termine poignée décharge manuelle commande la plaque chauffante montée et de descente

Pour toucher l'échantillon d'essai dans la chambre. L'extrémité avant du compartiment est le contrôle fermé et ouvert à travers la pièce qui est verrouillé en serrant les serrures fixé sur les bords avant du couvercle en pierre.

Le dispositif comporte des capteurs de température par thermocouples de type PT 100.
Elle contient également son pilote et le programme logiciel est préparé par le fabricant doit fournir.

1. Introduction

L'argile est très utilisée comme matériau de construction en bâtiment, son renforcement contribue à diminuer sa fragilité légendaire. Cette application dans le bâtiment est motivée par ses qualités fonctionnelles. Il est important de s'interroger sur le maintien ou non de ces performances lorsqu'il est mélangé à des fibres végétales et naturelles. Ce chapitre s'intéresse à examiner l'influence des fibres végétales sur le comportement mécanique et sur les caractéristiques thermiques des adobes d'argiles.

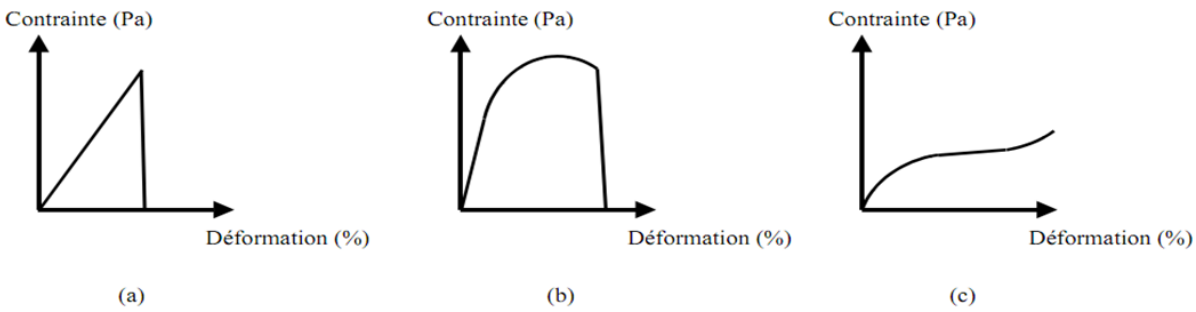
2. Aspects mécaniques :

Le dimensionnement d'une structure exige la connaissance du matériau et ses caractéristiques mécaniques, elles sont déterminées à l'aide d'essais mécaniques. Les plus utilisés sont notamment, les essais de traction, de flexion et de compression. Dans le cadre de notre étude, vu le manque du matériel, nous se limiterons à l'essai de compression

2.1. Essai mécaniques

2.1.1. Essai de traction

Il consiste à tirer sur une éprouvette de forme normalisée jusqu'à la rupture donnant lieu, après traitement, à une courbe contrainte/déformation. Cette courbe décrit la loi de comportement du matériau testé. On peut alors tout de suite connaître le type de rupture du matériau. Les trois formes de courbe de la figure(III.1) ci-dessous montrent les types de rupture.



Figure(III.1) – Courbes représentatives des principaux types de comportement d'un matériau sollicité en traction uniaxiale : a- comportement fragile (fonte, verre), b- comportement ductile (acier doux), c- comportement élastique non linéaire (élastomère).

Dans le premier cas, la rupture survient dans la zone élastique linéaire du matériau. Des matériaux comme la fonte, l'acier fortement allié, le verre, la céramique présentent ce type de comportement. Cette zone est décrite par la loi de HOOKE en fonction de la contrainte σ, du module d'élasticité E et de la déformation $\sigma = E\,\varepsilon$

Dans le second cas, le matériau présente d'abord un comportement élastique linéaire, la rupture survient après une zone de transition marquée par une déformation plastique irréversible du matériau délimitée par la limite élastique. C'est le cas par exemple des aciers faiblement alliés, des aciers inoxydables.

Dans le dernier cas, la déformation élastique n'est pas proportionnelle à la contrainte, c'est un comportement élastique non linéaire. Ce comportement caractérise par exemple l'élastomère et certains polymères.

La courbe de traction (contrainte/déformation) permet aussi de déterminer quatre grandeurs caractéristiques :

– le module d'élasticité E qui correspond à la pente de la zone élastique de la courbe,

– la limite élastique σ_e qui correspond à la contrainte à partir de laquelle se produit la déformation plastique,

– la résistance à la rupture ou résistance à la traction R_r qui correspond à la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.

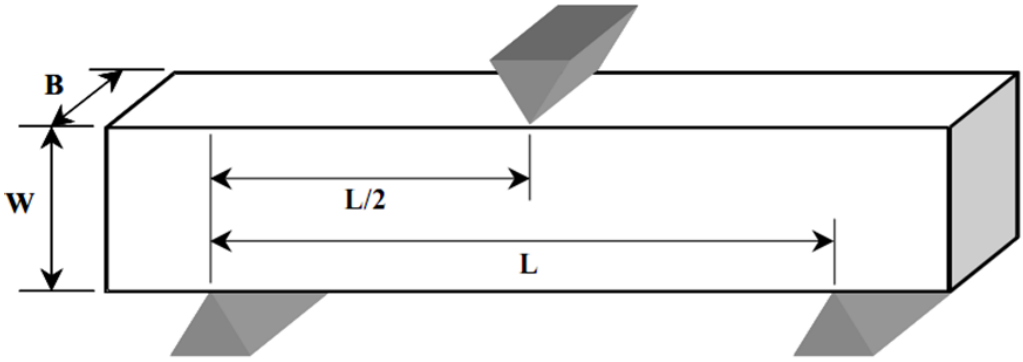
– la déformation à la rupture ε_r qui correspond à la déformation nominale à la rupture en traction de l'éprouvette.

C'est une grandeur caractéristique de la ductilité, elle se calcule en fonction de la longueur initiale l0 de l'éprouvette et la longueur à la rupture par la relation suivante :

$$\varepsilon_r = \frac{l - l_0}{l_0}.100$$

2.1.2. Essai de flexion

Très utilisé dans le cas des matériaux fragiles, le principe de cet essai est résumé par la figure3.2.



Figure(III.2) : Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points.

La courbe force/déplacement qui résulte de cet essai permet de calculer la contrainte maximale à la rupture _max sur la face en tension en fonction de la charge P, soit :

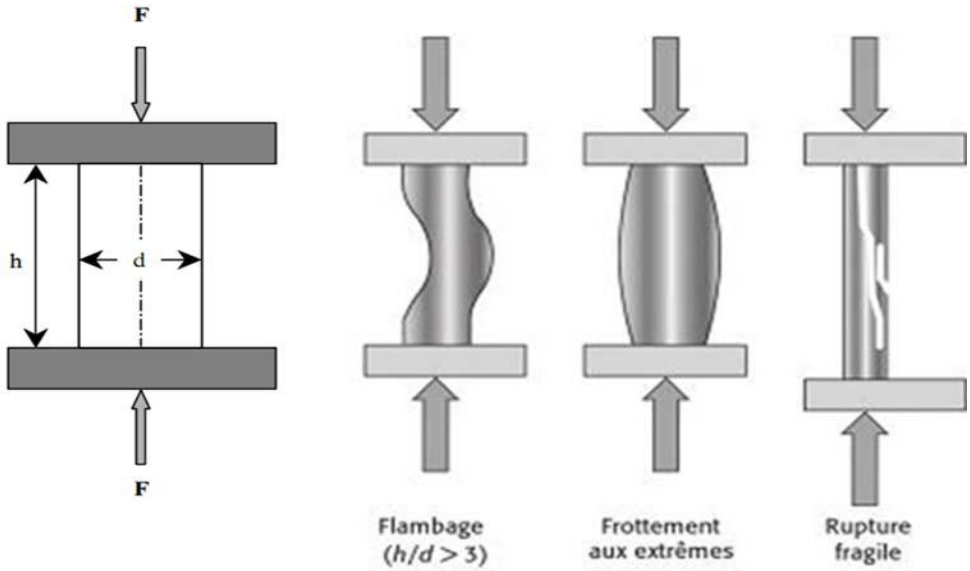
$$\sigma_{\max} = \frac{3.P.L}{2.B.W^2}.100$$

La relation 1.9 permet de calculer la déformation à la rupture puis, la flèche maximale Vc au centre de la poutre s'exprime par la relation suivante :

$$V_c = \frac{P.L^3}{4.E.B.W^3}$$ où E est le module d'Young du matériau.

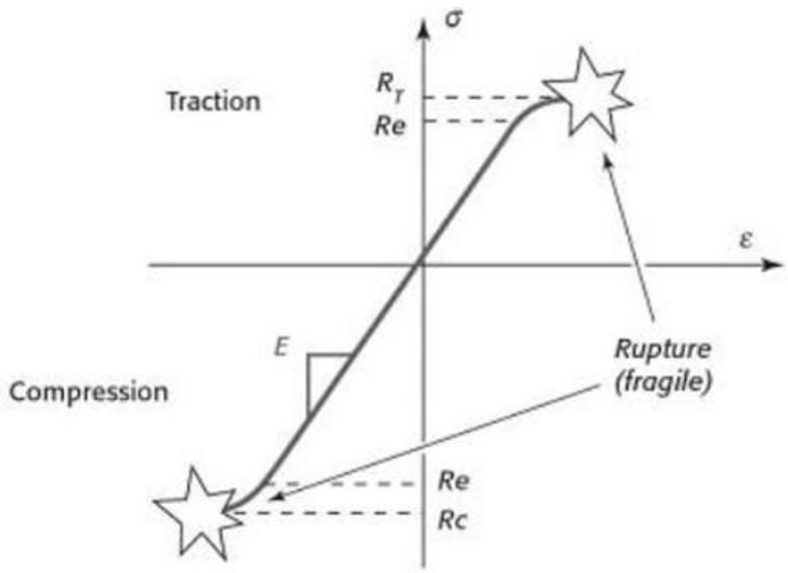
2.1.3. Essai de compression

Il consiste à soumettre une éprouvette à deux forces axiales opposées. Cet essai est très utilisé dans le cas des matériaux fragiles à la place de l'essai de traction pour déterminer la contrainte à rupture et le module d'élasticité du matériau. Des précautions sont cependant à prendre pour sa mise en œuvre pour éviter les perturbations du comportement du matériau par les phénomènes de flambage et de frottement sur les faces extrêmes de l'éprouvette. Le premier est obtenu par instabilité de l'éprouvette sous l'effet des efforts exercés ; le rapport h /d doit être inférieur à 3. Le second survient lorsque la déformation du matériau n'est pas homogène suite aux frottements sur les surfaces de contact éprouvette/plateaux de compression qui s'opposent localement aux déformations. Ce frottement doit être le plus faible possible à défaut d'être inexistant. La figure3.3 suivante permet de visualiser le principe de cet essai ainsi que les phénomènes indésirables à éviter.



Figure(III.3) – Schéma de principe de l'essai de compression et les phénomènes observables.

Les courbes obtenues sont similaires à celles de la traction Figure(III.4) et le mode de rupture est généralement fragile.



Figure(III.4) Exemple de courbe de compression tracée à l'inverse par comparaison à celle de traction

2.2. Effet du type de fibres sur les propriétés mécaniques des adobes :

2.2.1. Détermination de la résistance à la compression

La résistance mécanique d'un matériau de construction est de loin l'une des propriétés les plus importantes. En effet, la stabilité de la construction réalisée en dépend énormément. La résistance a été mesurée par une voie sèche ou « résistance sèche » effectuée sur les adobes, curées à l'air libre, (à l'état sec) à 14 jours. La résistance en compression exprimée en MPa est donnée par la formule :

$$\sigma_c = \frac{F}{S}$$

où F est la force appliquée en Newton; S la surface de contact des adobes avec le plateau en mm^2.

Les résultats de la résistance à la compression des cinq éprouvettes de composition contenant les différents types de fibres sont regroupés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : variation de la résistance à la compression en fonction du type de fibres.

Contenant 3% de fibres					
Matériaux	**Témoin**	**Halfa**	**Paille**	**Noyaux de dattes**	**régime de dattes**
Force donné par l'appareil (KN)	**3.4**	**4.60**	**8.80**	**2.7**	**1.3**
Aire de section d'éprouvette (m^2)	**0.0081**				
Résistance calculés (KN/m^2)	**419.75**	**567.90**	**1086.42**	**333.34**	**160.49**
Contenant 5% de fibres					
Force donné par l'appareil (KN)	**3.4**	**2.70**	**4.30**	**1.5**	**1.07**
Aire de section d'éprouvette (m^2)	**0.0081**				
Résistance calculés (KN/m^2)	**419.75**	**333.33**	**530.86**	**185.18**	**132.09**

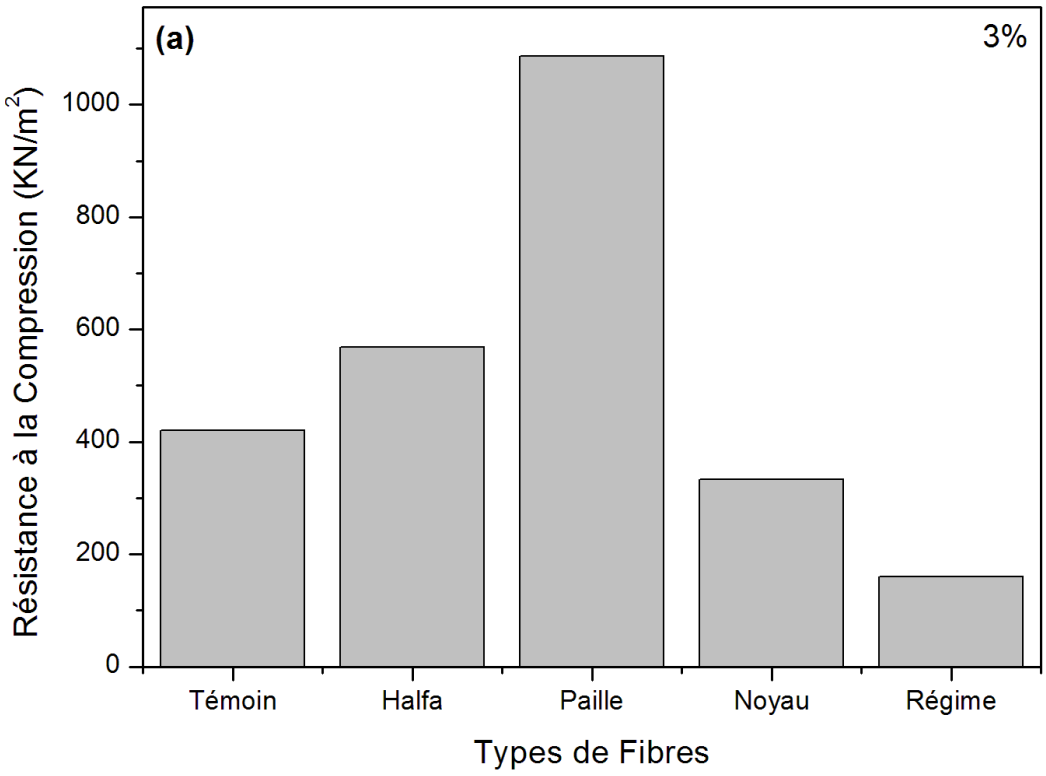
Les résultats de ces analyses sont présentés dans la La Figure (III.3). a et b qui représentent les histogrammes de la variation de la résistance à la compression en fonction des types de fibres à 14 jours. Ces courbes montrent que la résistance à la compression varie en fonction du type et de la teneur en fibres végétales. En examinant ces figures, on constate que lorsque le taux de fibres est de 3 %, la résistance maximale est donnée par l'éprouvette à base de fibre de paille dépassant de 160 % l'éprouvette sans fibres utilisée comme témoin, alors que la plus faible résistance est celle obtenue avec le régime de datte avec 61 % de moins de l'éprouvette témoin. Par contre lorsque le taux de fibre est de 5%, la résistance maximale est donnée toujours par l'éprouvette à base de fibre de paille dépassant de 26,5 % l'éprouvette témoin, et la plus faible résistance est celle obtenue avec le régime de datte avec 68 % de moins de l'éprouvette témoin.

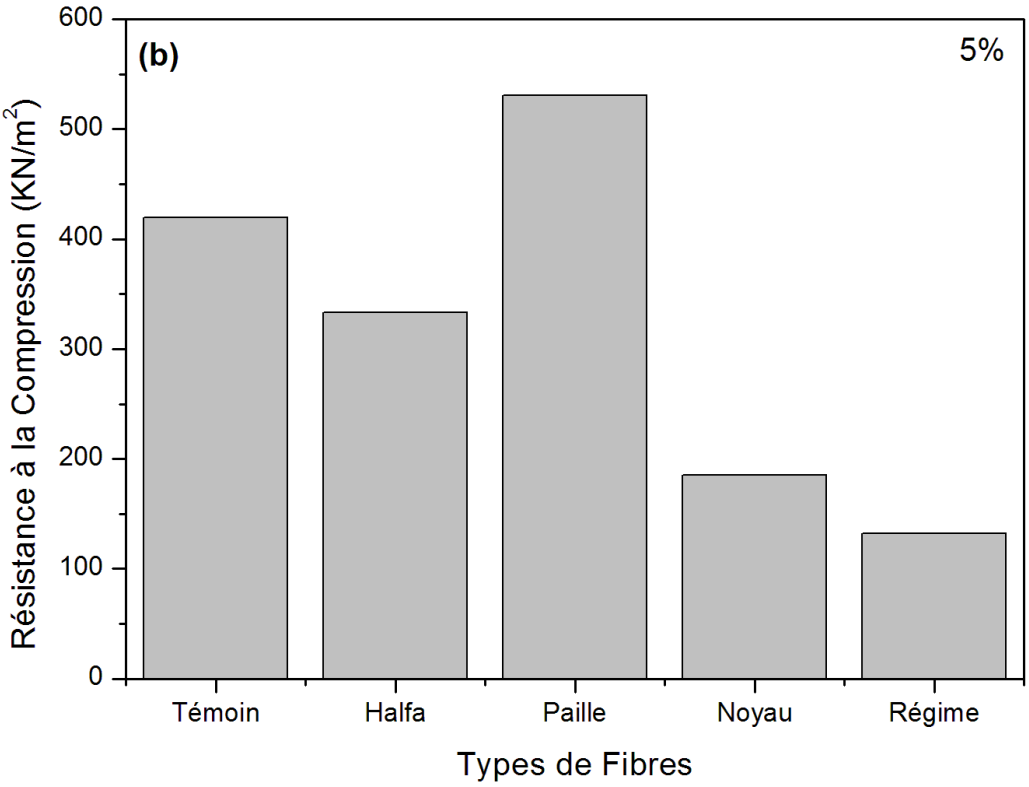
La petitesse de la résistance à la compression de adobe renforcée avec le régime de datte est peut être expliquée par le fait que:

la capacité d'adsorption de l'eau par le régime de datte qui confère le caractère humide au matériau, et /ou par la sa porosité importante provoquée par la flexibilité de ce type de fibre (régime de datte). cette flexibilité avant la prise du matériau, peut rendre l'adobe plus poreux.

L’analyse des résultats nous montre que la résistance avec renfort de fibres de paille dépasse toutes les autres résistances données par les autres compositions.

Ce résultat s’explique par l’augmentation de la dureté et le caractère multidimensionnel de la paille. le diamètre et l'adhérence des noyaux et du régime de datte sont la cause de la médiocrité du matériaux. pour la Halfa à son tour, provoque l'augmentation de la porosité qui devient alors la cause principale de la diminution de la résistance à la compression.

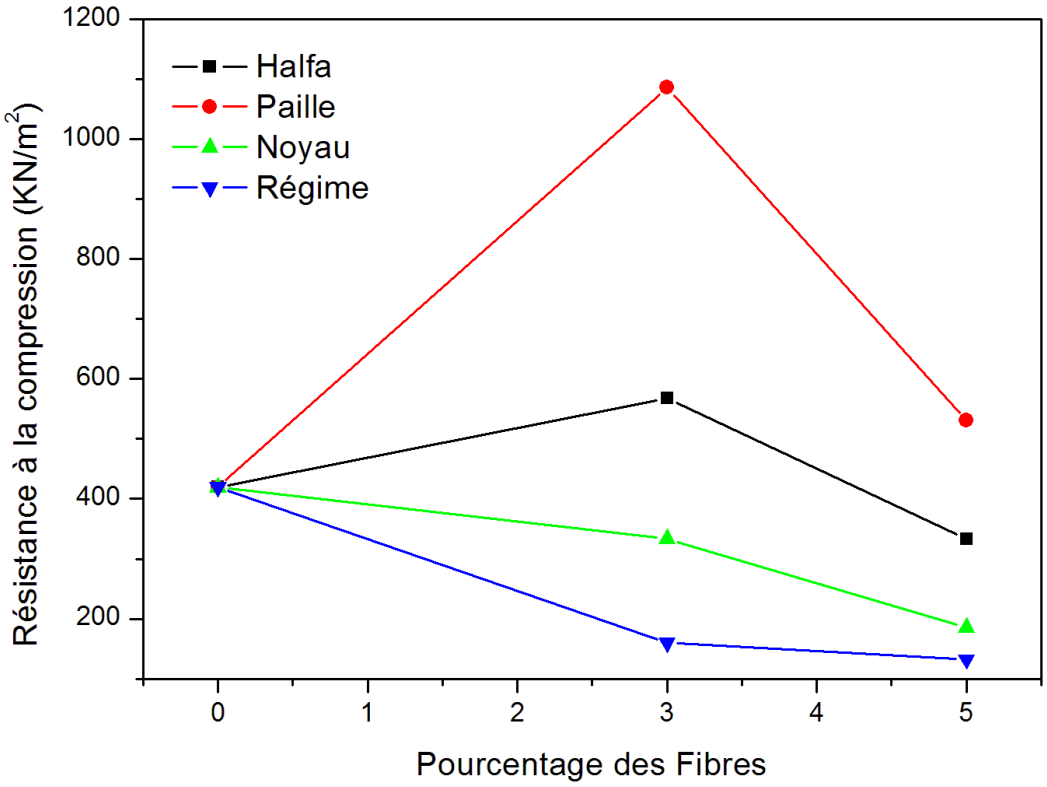




Figure(III.5): Evolution de la résistance à la compression en fonction du type de fibres de composition contenant (a) : 3 % (b) : 5% de fibres

2.2.2. Influence du taux de fibres sur les résistances mécaniques en compression

La figure(III.6) montre que l'augmentation du taux de fibres dans l'adobe de terre influe négativement sur les contraintes de compression pour les éprouvettes contenant de la terre + fibres (Noyaux de dattes, régime de datte). Il apparaît clairement que l'incorporation de fibres dans la terre crue n'améliore pas la résistance à la compression pour ces types de fibres. contrairement aux éprouvettes contenant de la terre + fibres (Halfa , paille). Cette augmentation des contraintes de compression est du au rôle joué par les fibres (comme une armature reprenant les efforts de traction et à la bonne liaison entre la terre et les fibres. A partir de 3% de fibres les contraintes diminuent, à cause de l'adhérence entre fibres et pâte de terre qui devient faible (augmentation du nombre de fibres). On remarque aussi que les résistances des adobes de terre renforcées de fibres de paille sont meilleures à celles des adobes renforcées de fibres de Halfa. Cette supériorité de la composition contenant les fibres de paille, par rapport à d'autre composition, est due à une bonne adhérence entre la pâte et la fibre de paille à cause de la disposition multidimensionnelle des fibres de paille.



Figure(III.6): Evolution de la résistance à la compression des éprouvettes contenant de 0 à 5 % de fibres.

3. Aspects thermiques

La connaissance des caractéristiques thermiques d'un matériau de construction est indispensable pour permettre à l'ingénieur de juger de son application. Pour cela, dans les laboratoires, ingénieurs et chercheurs ont recours à diverses méthodes pour évaluer les propriétés thermiques d'un matériau en fonction de leurs besoins. Les plus classiques utilisent des capteurs de température de contact comme la méthode Flash, celle de la boite chaude. nous utilisons dans le cas de notre étude la boite chaude.

3.1. Généralités sur le transfert thermique

3.1.1. Le transfert thermique

Lorsque deux points distincts d'un corps (ou bien deux corps en contact) ont la même température, on dit qu'ils sont en équilibre thermique.

Si leur température est différente, l'énergie est cédée par le point ou le corps le plus chaud au point ou corps le plus froid. Il y a donc transfert thermique. Le transfert thermique correspond donc à une transmission de l'énergie contenue dans une zone vers une autre.

3.1.1.1. Champ de température

L'évolution de la température dans l'espace et dans le temps permet de déterminer les transferts d'énergie. La température est alors une fonction du temps et des coordonnées (x;y;z) de l'espace : T = f(x;y;z;t). On appelle champ de température, la valeur à chaque instant de la température en tout point. On distingue deux cas de figure : lorsque le champ de température est indépendant du temps, on dit que le régime est permanent ou bien stationnaire ; lorsqu'il évolue avec le temps, on dit que le régime est variable ou instationnaire.

3.1.1.2. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\overrightarrow{grad}\,(T) = \frac{\partial T}{\partial n}.\vec{n}$$

Avec :

$\vec{n}$ Vecteur unitaire de la normale,

$\frac{\partial T}{\partial n}$ Dérivé de la température le long de la normale.

3.1.1.3. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur Q transmise par unité de temps et par unité d'aire S (en m^2) de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur. Il s'exprime en $Wm^{-2.}$

$$\Phi = \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Le flux de chaleur est la quantité de chaleur Q en (W) transmise sur la surface S par

unité de temps :

$$\varphi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Les échanges thermiques sont classées en trois grandes familles de phénomènes physiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

3.1.1.4. Modes de transfert thermique

a) Conduction

C'est le transfert de chaleur dans la masse d'un milieu matériel, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. Ce qui se traduit, pour un matériau isotrope et homogène, par l'équation :

$$\vec{\varphi} = -\lambda . S . \vec{grad}(T)$$

Cette équation s'écrit sous forme algébrique comme suit :

$$\varphi = -\lambda . S . \frac{\partial T}{\partial x}$$

Avec:

φ (W) Flux de chaleur transmis par conduction

λ (W m^{-1} / ^oC) Conductivité thermique du milieu

x (m) Variable d'espace dans la direction du flux

S (m^2) Aire de la section de passage du flux de chaleur

La description analytique des échanges par conduction est faite par le premier principe de la thermodynamique sur la conservation de l'énergie en tout point qui conduit à l'équation de la chaleur sous sa forme générale :

$$\rho.C_p.\frac{\partial T}{\partial t} = div\left(\lambda.\overrightarrow{grad}(T)\right) + q$$ Avec:

Cp la capacité thermique massique à pression constante,

ρ la masse volumique du matériau considéré,

λ la conductivité thermique du matériau,

q l'apport de chaleur interne.

b) Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Le mouvement du fluide peut avoir deux causes. Il peut être imposé de l'extérieur par une machine (pompe, ventilateur, compresseur) : c'est la convection forcée ; ou bien par le contact du fluide avec la surface du solide plus chaude ou plus froide entraînant la création des différences de masse volumique, génératrices de mouvement au sein du fluide ; c'est la convection naturelle. La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection ci-dessus cités. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h.S.\left(T_p - T_\infty\right)$$ avec:

Φ (W) Flux de chaleur transmis par convection

h ($Wm^{-2}K^{-1}$) Coefficient de transfert de chaleur par convection

T_p (K) Température de surface du solide

T_∞ (K) Température du fluide loin de la surface du solide

S (m^2) Aire de la surface de contact solide/fluide

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

c) Rayonnement

Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur, en ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une avec l'autre. Elles peuvent même être séparées par le vide. La manifestation la plus commune de ce phénomène est celle du rayonnement solaire qui nous parvient sur la terre après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial. Le rayonnement est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces. Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant ; dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma_s \,.\varepsilon_p \,.S.\left(T_p^{\ 4} - T_\infty^{\ 4}\right)$$ avec:

φ (W) Flux de chaleur transmis par rayonnement

σ_s (5,67:$10^{-8}$$Wm^{-2}K^{-4}$) Constante de Stefan

ε_p Facteur d'émission de la surface

T_p (K) Température de la surface

T_∞ (K) Température du milieu environnant la surface

S (m2) Aire de la surface

Les caractéristiques du rayonnement thermique dépendent de la température du corps émetteur et des caractéristiques physiques de la surface émettrice. La propriété thermique du matériau qui conditionne l'émission est l'émissivité du matériau. Elle dépend de la nature du matériau, de l'état de la surface et des couches moléculaires proches de la surface.

3.1.1.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ) est le flux de chaleur, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant (faible conduction).

3.1.1.6. Résistance thermique

La résistance thermique (R) est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en $m^2.K.W^{-1}$. Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique. Elle se calcule par la relation suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$ Avec :

R m^2:K:W^{-1} résistance thermique

e (m) épaisseur de l'isolant

λ $W.m^{-1}.K^{-1}$ conductivité thermique

3.2.1. Influence du type de fibres végétales sur le comportement thermique des adobes :

Le tableau (III.2) illustre les différentes mesures obtenues par la boite chaude et ces valeurs nous permettra de calculer les conductivités thermiques de chaque echantillon.

Tableau(III.2) : résultats de la boite chaude.

	Témoin	**Halfa**	**Paille**	**Noyaux de dattes**	**Arjun de dattes**
T_1 C°	42.2	42.6	42.2	42.4	42.3
T_2 C°	23.3	25.5	24.6	24.4	24.9
T_3 C°	24.3	23.4	24.7	24.6	24.2
$\bar{T}$ C°	32.75	34.05	33.4	33.4	33.6
dT C°	18.9	17.1	17.6	18	17.4
PV C°	45.2	45.1	45	45.1	44.9
Hfm(mv)	16.8	16.2	16.4	15.7	10.4

***Grandeurs mesurées* :**

Avant de mettre l'échantillon à l'intérieur de la boite chaude, la connaissance des dimensions et la masse de chaque adobe est indispensable.

Tableau(III.3): dimensions et masse des briques d'argile.

	Témoin	**Halfa**	**Paille**	**Noyaux de dattes**	**Arjun de dattes**
Is(m)	0.037	0.03	0.031	0.035	0.027
V (m³)	$3{,}33.10^{-3}$	2,7.10-3	$2{,}79.\ 10^{-3}$	$3{,}15.\ 10^{-3}$	$2{,}43.\ 10^{-3}$
M (kg)	6.520	5.850	5.395	6.485	6.275

***Calcul de la conductivité thermique* :**

Le calcul se fait à l'aide des coefficients d'étalonnage spécifique de l'appareil

$\lambda = Is*[(K1+ (K2*\bar{T})) + ((K3+ (K4* \bar{T}))*HFM) + ((K5+K6* \bar{T}))*HMF^2)]/dT.$

$R=Is/ \lambda$

Is : est l'épaisseur de l'échantillon

$\bar{T}= T2+T1/2$

$dT= T2-T1$

Avec Ki sont des coefficients donnés par le constructeur de l'appareil :

K1= -31.7383

K2=0.4792

K3= -31.7383

K4=0.0558

K5=0.0279

K6= -0.0005

le tableau(III.4) rassemble les valeurs de la conductivité et de la résistance thermique de chaque échantillon étudié.

Tableau III.4 : valeurs de la conductivité et de la résistance thermique

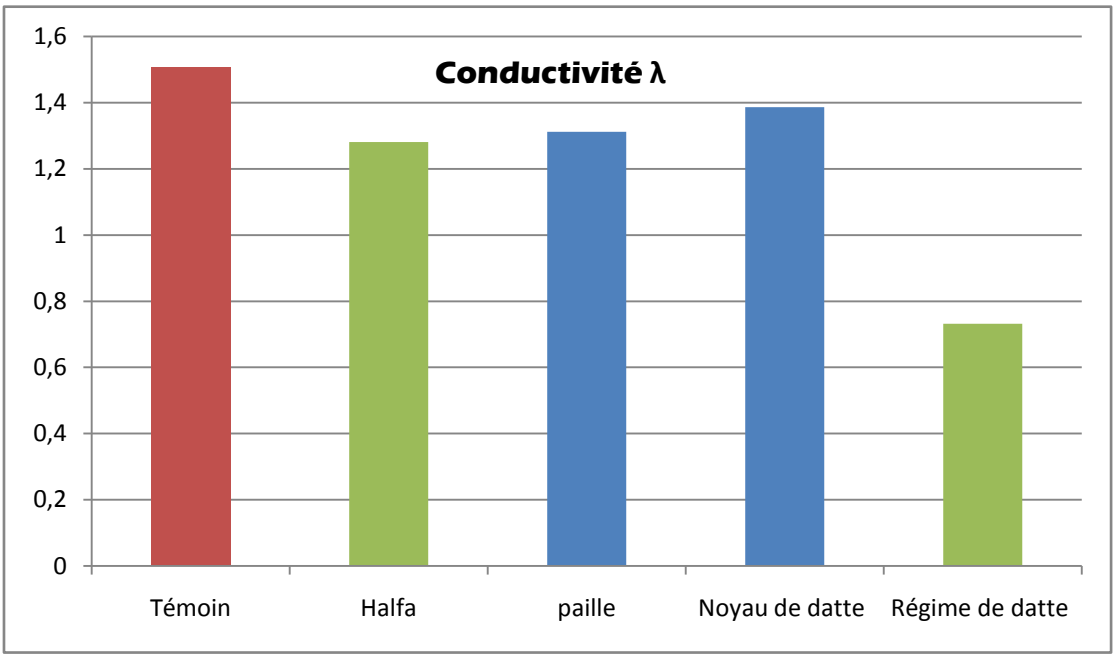
	Témoin	**Halfa**	**Paille**	**Noyaux de dattes**	**Régime de dattes**
Conductivité Thermique λ (W/mK)	**1.505**	**1.281**	**1.312**	**1.386**	**0.732**
La résistance thermique R (W/m²K)	**0.025**	**0.023**	**0.024**	**0.025**	**0.036**

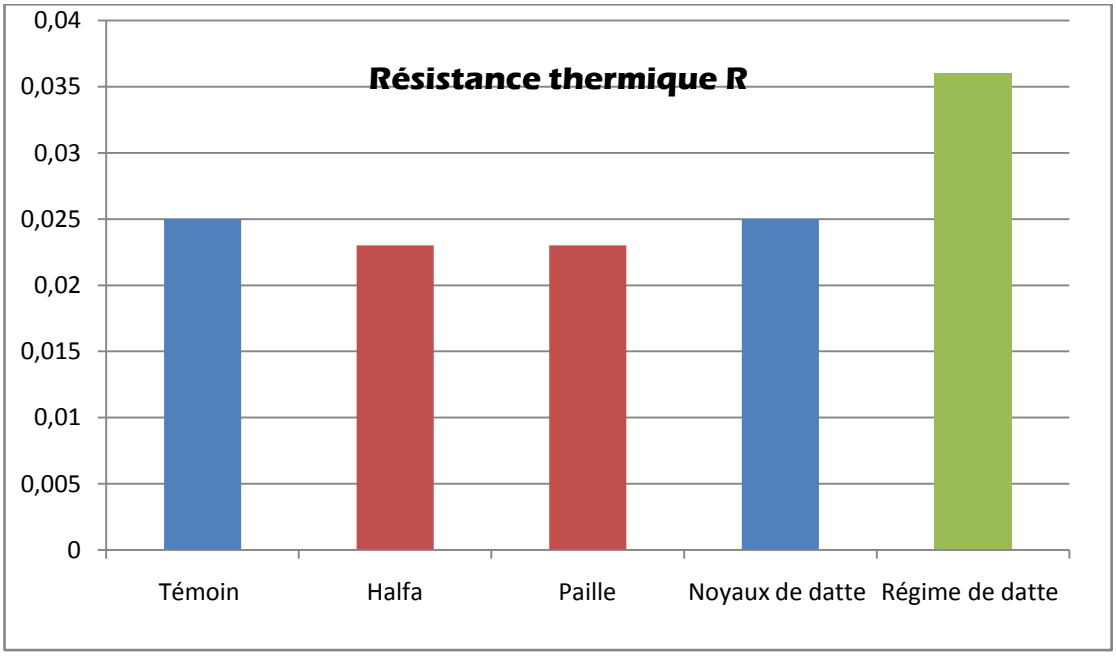
La figure (III.7) montre l'évolution de la conductivité et de la résistance thermique des adobes traitées aux fibres végétales en fonction du type de fibre. l'analyse de ces résultats montre que la conductivité thermique diminue et dépend considérablement des types de fibres. donc l'adobe armé de fibres présente une meilleure propriété thermique. L'adobe témoin possède la plus haute valeur de la conductivité thermique, comparé aux autres types d'adobes. Celle de l'adobe de composition contenant du régime de datte est la plus basse, du fait de la nature de ces fibres qui ont une grande capacité d'adsorption de l'eau. ce comportement est étayé par le résultat de la résistance à la compression.

A cause de leurs structures poreuses, faible résistance à la compression provoquée par une porosité importante, les matériaux de construction humides se caractérisent par un comportement complexe. Ils sont généralement constitués de trois phases:

- une phase solide, qui constitue la structure du matériau, une phase liquide, qui représente l'eau libre ou absorbée par le matériau et une phase gazeuse, qui est l'air humide contenu dans les pores. Considérées individuellement, chacune de ces phases présentent des caractéristiques thermiques qui lui sont propres; des interactions thermiques se manifestent aussi entre les différentes phases. Une évaluation rigoureuse d'un comportement global du matériau doit tenir compte de l'ensemble de ces réalités.

Ce résultat se corrobore avec celui de la propriété mécanique qui stipule qu'un matériau poreux ne donne pas une bonne résistance à la compression. ce résultat peut être attribué au fait que l'adobe de composition contenant le régime de datte est plus poreux que les autres types d'adobes.





Figure(III.7) : Histogramme de la variation de la conductivité et de la résistance thermique en fonction de types de fibres.

Conclusion générale :

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

A travers le patrimoine mondial de construction en terre, on dénombre plusieurs techniques d'utilisation de terre pour la construction : l'adobe, le pise, le torchis, la terre paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, blocs terre comprimee BTC……etc.

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

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

L'avantage du coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques explique en partie la tendance d'utilisation en faveur des fibres naturelles. Mais il faut dire, que l'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie, à savoir : l'adherence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problemes de compatibilite, la sensibilite a l'humidite, la degradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres.

Ce travail nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques thermiques des adobes de terre, en incorporant différents types de fibres végétales, qui

ont un l’intérêt majeur et plus précisément les fibres de paille. Pour une meilleure résistance le taux de fibres ne doit pas dépasser 3 % en termes de masse.

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

– La cure a l’air libre des adobes a donne des résistances a la compression plus au moins acceptables, comparativement à d'autre type de cure accélérée au laboratoire, d’ou son intérêt économique comparée a la cure a l’étuve.

– Une réduction de la masse volumique apparente des adobes avec l’augmentation de la teneur en fibres a été observée. Cette propriété peut donner au matériau le caractère de légèreté.

– L’ajout des fibres de paille à peu a d’amélioration de la résistance à la compression et de la conductivité thermique.

Liste de références:

[1]- « Traité de construction en terre Broché » Hubert Guillaud (Auteur), Hugo Houben (Auteur), CRATerre. 24 janvier 2006.

[2]- « ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES »… TAALLAH Bachir. 14/12/2014

[3]- Projet Fin d'Etudes « Proposition d'un nouvel espace hospitalier a Tiaret » BENOUALI Juba. 2011.

[4]- « Date Palm Genetic Resources and Utilization: Volume 1: Africa and the Americas » Benziouche, 2012.

[5]- thèse de doctorat « caractérisation des éléments de structure en béton de fibres métallique ». Djebali Said(2013).

[6]- Le rapport Brundtland est le nom communément donné à une publication, officiellement intitulée Notre avenir à tous (Our Common Future), rédigée en 1987par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par la Norvégienne Gro Harlem Brundtland.

[7]- (Grunberger, 1995) Engineering Geology and the Environment, Volume 2 Par Paul G. Marinos.

[8]- « Hypothèses 2006 ». Konan.

[9]- « construire en terre » par le CRAterre Auteur(s) : Patrice Doat, Alain Hays, Hugo Houben, Silvia Matuk, François Vitoux. (Doat, 1979).

[10] - La wilaya d'Adrar, dont elle est le chef-lieu, située à 1 400 km au sud-ouest d'Alger.

[11] -Essai de résistance « uniaxial » sur des éprouvettes de forme géométrique simple: cylindre ou parallélépipède (barre ou cube). On charge à vitesse constante jusqu'à obtenir la rupture de l'éprouvette. Norme : NBN : EN 1926 : 2007 ; NF P94-420 ; NF P94-425.

[12]-'étude de la conductivité thermique des matériaux de construction pour banc pédagogique d'étude des méthodes de transmission de chaleur H112.