



# Mémoire de Fin d'Etudes

## Présenté au

**Département** : Génie Civil  
**Domaine** : Sciences et Techniques  
**Filière** : Génie Civil  
**Spécialité** : Infrastructure de transport

## Réalisé par

**LAYEB Abdelouhab**  
**HALBAOUI Ahmed**

**Pour l'obtention du diplôme de**  
**MASTER ACADEMIQUE**

## Intitulé

*Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre)*

Soutenu le : ...../07/2017

Devant le jury de soutenance composé de :

MM : .....	MCA	Univ. Djelfa	Président
Bekhiti Melik	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
Rabehi Mohamed	Prof.	Univ. Djelfa	Co-encadreur
.....	MAA	Univ. Djelfa	Examineur

## DEDICACES

*On dédie ce modeste travail à nos  
parents , à tous les membres de  
nos familles, et à tous nos amis.*

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force de finir ce modeste travail de recherche dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier par cette occasion, notre encadreur

M. Bekhiti Mlik et l'enseignant chargé du suivi, M. Rabhi Mohamed

Comme nous remercions nos parents, nos camarades, nos amis et tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace	
<i>Remerciement</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableau</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Introduction</i>	

**CHAPITRE 1 SYNTHÈSE ET ESQUISSE SUR LES MATERIAUX**

<i>Introduction.....</i>	<i>06</i>
<i>1.2 la terre crue .....</i>	<i>06</i>
<i>1.2.1La dobe.....</i>	<i>06</i>
<i>1.2.1.1.Définition.....</i>	<i>06</i>
<i>1.2.1.2 La production.....</i>	<i>:07</i>
<i>1.2.1.3. Modes de production de l'adobe.....</i>	<i>07</i>
<i>1.2.1.4. Les produits.....</i>	<i>09</i>
<i>1.2.1.5. Les avantages de l'adobe.....</i>	<i>09</i>
<i>1.2.2. Les pisés:.....</i>	<i>09</i>
<i>1.2.2.1. Définition.....</i>	<i>09</i>
<i>1.2.2.2 Technique de production.....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.3 Les produits : différents types de pisé.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2.4 Les Avantages de pisé.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3. Les Blocs de terre comprimée.....</i>	<i>:11</i>
<i>1.2.3.1. Définition.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3.2. Production des blocs de terre comprimée .....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3.3. Les Avantage de bloc de terre comprimée .....</i>	<i>:12</i>
<i>1.2.3.4 Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.3.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3. La terrent matériau de construction.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.1 Définition.....</i>	<i>:15</i>
<i>1.3.3 Rappel sur les argiles.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2Composition.....</i>	<i>15</i>

1.3.3.1	Définition.....	16
1.3.3.2	Principaux types d'argiles.....	16
1.3.3.3	Texture ou Granularité.....	18
1.3.3.4	La plasticité.....	19
1.3.3.5	La compressibilité.....	19
1.3.3.6	La cohésion.....	20
1.4	Stabilisation:.....	20
1.4.1	Définition.....	20
1.4.2	Objectifs.....	21
1.4.3	Procédés.....	21
1.4.3.1	Stabilisation mécanique.....	21
1.4.3.2	Stabilisation physique.....	21
1.4.3.3	Stabilisation chimique.....	21
1.4.4	Moyens de stabilisation.....	22
1.4.5	Densification par compression.....	22
1.4.6	Méthodes de compression.....	23
1.4.6.1	Influence de la teneur en eau sur la densité.....	23
1.4.7	Influence de la granularité du sol.....	26
1.4.8	Densification par gradation.....	27
1.4.9	Stabilisation au ciment.....	28
1.4.9.1	Généralités.....	28
1.4.9.2	Mécanisme de stabilisation.....	28
1.4.9.3	Efficacité et dosage.....	30
1.4.10	Stabilisation à la chaux.....	31
1.4.10.1	Généralités.....	31
1.4.10.2	Mécanismes.....	32
1.4.10.3	Efficacité et dosage.....	33
1.4.11	Stabilisation par fibres.....	34
1.5	Généralités sur les fibres.....	34
1.5.1	Introduction.....	34
1.5.2	Historique et perspective de l'utilisation des fibres.....	34
1.5.3	Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction.....	35
1.5.4	Différents types de fibres.....	36

1.5.5. Classification des fibres végétales.....	37
1.5.6. Les fibres de caoutchouc .....	38
1.5.6.1 Le caoutchouc.....	39
1.5.6.2. Poudrette de caoutchouc .....	39
1.5.6.3. Les caractéristiques des granulats de caoutchouc ..	40
1.5.7. Fibres artificielles : .....	41
1.5.7.1 - Les fibres de verre.....	41
1.5.7.2. L'adhésion mécanique interface .....	44
1.5.7.3 L'adhésion physico-chimique .....	44
1.5.7.4 L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols_.....	44
1.6 Conclusion.....	46

## CHAPITRE 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

2.1. Introduction.....	48
2.2. Matériaux utilisés et méthode des essais .....	48
2.2.1. Sol.....	48
2.2.1 .1. Origine du sol .....	48
2.2.1 .2. Caractéristiques physiques du sol .....	48
2.2.1 .3. Analyse chimique et minéralogique .....	51
2.2.2. Sable de dune .....	52
2.2.2.1- Analyse chimique .....	52
2.2.2.2 - Analyse granulométrique .....	52
2.2.2.3- Equivalent de sable .....	53
2.2.3 -Ciment .....	54
2.2.3 .1 Les caractéristiques de ciment .....	54
2-2-4 La chaux.....	55
2.2.5. L'eau gâchage.....	56
2.2.5.2- La fibre de verre.....	56
2.2.6. Fibres.....	56
2.2.6.1. Fibres caoutchouc.....	57
2.3. Confection des blocs .....	58
2.3.1. Matériel spécifique.....	58

2.3.2 –Mélanges.....	59
2.3.3-Codification des mélanges.....	66
2.3.4-Préparation des mélanges.....	67
2.3.5-Optimisation de la teneur en eau.....	68
2.3.6-Compaction des mélanges.....	69
2.4.La cure des blocs.....	70
2.4.1.Conservation au laboratoire.....	70
2.5 Propriétés mécaniques.....	71
2.5.1 -Essais de compression simple.....	71
2.5.2- Essai de traction .....	72
2.6- Conclusion.....	74

## CHAPITRE 3 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

3.1Introduction.....	76
3.2.Résistance à la compression $R_C$ 28 de BTS.....	76
3.2.1 L'effet de la variation de la teneur des fibres (caoutchouc - verre) sur la résistance à la compression à 28j de BTS.....	77
3.3 Densité sèche de BTS.....	78
3.3.1 L'effet de la variation de la teneur des fibres sur la densité sèche de BTS.....	79
3.4 Résistance à la traction de BTS à 28 jours.....	79
3.4.1 L'effet de la variation de la teneur de fibre de caoutchouc et de fibre de verre et type de liant sur la résistance à la traction de BTS.....	80
3.5 Conclusion.....	81
Conclusion général.....	82
Annexes.....	I

## Liste des figure

### **CHAPITRE 1 SYNTHÈSE ET ESQUISSE SUR LES MATÉRIAUX**

<i>Fig1.1.Moulage et séchage des blocs adobes.....</i>	<i>07</i>
<i>Fig1.2.Moule de l'adobe.....</i>	<i>08</i>
<i>Fig1.3.Coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé.,.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 1.4.Construction un mur en pisé.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig1.5.Composition de pisé.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig1.6. Bloc de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.7.Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....</i>	<i>13</i>
<i>Fig. 1.8 : Différents produits de blocs de terre comprimée (Architectures des terre cure /Sophie Bronchart 2013).....</i>	<i>14</i>
<i>Fig 1.9. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.....</i>	<i>14</i>
<i>Fig. 1.10. Schéma de la structure de la kaolinite, (d'après Lambe,1953).....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 1.11.Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim,1986).....</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 1.12.Schéma de la structure de la montmorillonite, (d'après Lambe,1953).....</i>	<i>17.</i>
<i>Fig. 1.13.Structure de la montmorillonite (Reinholdt,2001).....</i>	<i>17.</i>
<i>Fig. 1.14. Schéma de la structure de l'illite. D'après Lambe, 1953.....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 1.15. Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz, 1991).....</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 1.16. Effet du compactage sur les vides des sols(DeJong-Hughes, 2001).....</i>	<i>23.</i>
<i>Figure 1.17. Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).....</i>	<i>24</i>
<i>Fig 1.18. Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 1.19. La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding,1993).....</i>	<i>25</i>
<i>Fig.1.20. Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).....</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 1.21. La relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol (USAGE,2000) .....</i>	<i>26</i>
<i>Fig 1.22. Evolution des limites d'Atterberg avec la teneur ensable(Doat,1979).....</i>	<i>27</i>

<i>Fig 1.23. Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa (Guettala, 2003).</i>	27
<i>Fig . 1.24. Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).</i>	30
<i>Fig. 1.25. Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979).</i>	32
<i>Fig1.27.Les classes des fibres végétales.</i>	37
<i>Fig.1.28.Fibres des pneus de caoutchouc.</i>	38
<i>Fig1.29.:Aspect des poudrettes de caoutchouc.</i>	39
<i>Fig1.30. Les différents diamètre des granulats des pneus usées après broyage.</i>	40
<i>Fig 1.31. Procédé d'étirage du verre par le procédé "fusion directe". Document VetrotexSaintGobain.</i>	41
<i>Fig 1-32 Représentation schématique d'une interface.</i>	45

## CHAPITRE 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

<i>Fig.2.1 :tamisage de sol.</i>	48
<i>Fig.2.2: courbe granulométrique non corrigée.</i>	49
<i>Fig.2.3 : Intervalle de confiance de la courbe granulométrique.</i>	50
<i>Fig.2.4 : Courbe granulométrique du sable de dune.</i>	53
<i>Fig. 2.5 : Essai équivalent de sable.</i>	54
<i>Fig.2.6. Les fibres découpées en morceaux.</i>	57.
<i>Fig.2.7 : Fibre de verre utilisée de type Cemfil (A.R).</i>	58
<i>Fig. 2.8.Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC.</i>	59
<i>Fig.2.9.moule utilisé pour la fabrication de.</i>	59
<i>Fig. 2.10: Combinaison des mélanges des bloc.</i>	60.
<i>Fig2.11.Le poids du mélange global sec pour chaque bloc.</i>	66
<i>Fig2.12. :mélange global sec( 2Kg).</i>	66..
<i>Fig2.13: malaxeur.</i>	67
<i>Fig2.14 : mélange après malaxage avec les fibres de verre.</i>	67.
<i>Fig. 2. 15: Optimisation de la teneur en eau.</i>	69
<i>Fig. 2. 16. appliqué contrainte de compactage (5 MPa).</i>	70
<i>Fig. 2. 17. Conservation des blocs au laboratoire.</i>	71

<i>Fig. 2. 18. Essai de compression.....</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 2. 19. Essai de traction .....</i>	<i>73</i>

### **CHAPITRE 3 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**

<i>fig 3.1. L'effet de teneur des fibres (caoutchouc – verre) sur la résistance à la compression de BTS .....</i>	<i>77</i>
<i>Fig 3.2. L'influence du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre sur la densité sèche de BTS à différents liant hydraulique.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 3.3. Effet du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre, type de liant (chaux et ciment) sur la résistance à la traction de BTS.....</i>	<i>80</i>

# Liste des Tableaux

## **CHAPITRE 1 SYNTHÈSE ET ESQUISSE SUR LES MATÉRIAUX**

Tableau 1.1 : Moyens de stabilisation des terre remaniées (Houben,2006).....	22
Tableau 1.2. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres.....	36
Tableaux1.3. Propriétés physiques et techniques des fibres.....	38
Tableau 4 : Distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø20 mm et Ø16 mm.....	40
Tableau 1.5. Usages des principaux types de verre.....	: 43
Tableau 1.6. Principales propriétés mécaniques de quelques types de verre.....	43
Tableau 1.7. Compositions de quelques types de verre.....	43

## **CHAPITRE 2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**

Tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.....	48
Tableau 2.2 .Caractéristiques géotechniques du matériau.....	50
Tableau 2.3.L'analyse par diffraction de rayons X a permis de déterminer la composition minéralogique.....	::51
Tableau 2.4 . La composition minéralogique du sol.....	51
Tableau 2.5. Analyse chimique du sable de dune.....	52
Tableau 2.6. Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune.....	53
Tableau 2.7. Equivalent de sable du sable de dune.....	54
Tableau 2.8. Les caractéristiques de ciment.....	55
Tableau 2.9.composition chimique de la chaux.....	56
Tableau 2.10. Composition chimique du verre A.R.....	57
Tableau 2.11.Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R.....	58
Tableau 2.12. Composition des différents mélanges employés dans cette étude .....	:60
Tableau2.13.Codification des mélanges.....	66
Tableau 2.14. Optimisation de la teneur en eau.....	68
Tableau 2.15. La contrainte de compactage des mélanges.....	69

## **CHAPITRE 3 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**

Tableau 3.1. Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres.....	76
Tableau 3.2. Densité sèche de béton de terre stabilisé - BTS.....	78
Tableau 3.2. Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres.....	79



## RESUME

Afin de réduire les coûts de construction et de l'énergie consommée dans le chauffage et la climatisation, l'utilisation de la fibre de caoutchouc et de fibre de verre pour installer des blocs de terre stabilisés.

Pour ce travail, le but principal est d'étudier l'effet de l'utilisation de la fibre, en particulier la fibre du caoutchouc par rapport à la fibre de verre sur les propriétés mécaniques et le comportement des blocs mécaniques du sol stabilisé. Dans ce contexte, nous avons utilisé le rapport de la chaux (12%), le ciment (10%) et six niveaux de fibres (% 0,05% 0,1, 0,15%, 0,20%, 0,25% et 0,3%) du mélange sec .

Les résultats indiquent que la résistance à la compression augmente avec la proportion de fibres au ratio très 0,20 pour la fibre de caoutchouc et les fibres de verre, un maximum, puis commence à diminuer pour augmenter les rapports de la fibre.

En revanche, la présence de fibres a un effet positif sur le comportement mécanique du matériau composite, et en augmentant la souplesse par rapport à un comportement remarquable sensibilité de réfraction d'un matériau non fibreux. Cette étude a également montré que l'augmentation de la surveillance du stress a un effet positif sur les différentes caractéristiques étudiées.

### ملخص

للحد من تكاليف البناء والطاقة المستهلكة في التدفئة والتكييف ، تم استخدام ألياف المطاط والزجاج لتثبيت كتل التربة المضغوطة ، والغرض الرئيسي من هذه الدراسة معرفة تأثير استخدام الألياف، وخاصة ألياف المطاط مقارنة بألياف الزجاج على الخواص الميكانيكية والسلوك الميكانيكي لكتل التربة المضغوطة. وفي هذا السياق، استخدمنا نسبة الجير (12%) والاسمنت (10%) وستة مستويات من الألياف (0.1%، 0.05%، 0.15%، 0.20%، 0، 25% و 0.3%) من الخليط الجاف. وتشير النتائج إلى أن قوة الضغط تزيد مع زيادة نسبة الألياف حتى 0.20% نسبة للألياف المطاط والألياف الزجاجية، كحد أقصى، ثم تبدأ في الانخفاض إلى زيادة نسب من الألياف. في المقابل، فإن وجود ألياف له تأثير إيجابي على السلوك الميكانيكي للمواد المركبة، وزيادة المرونة فيما يتعلق السلوك المتميز بالقابلية للانكسار مقارنة بمادة غير ليفية. وأظهرت هذه الدراسة أيضا أن زيادة مراقبة الإجهاد له تأثير إيجابي على الخصائص المختلفة التي شملتها الدراسة.

## **ABSTRACT**

In order to reduce construction costs and energy consumed in heating and cooling, the use of rubber and fiberglass fiber to install stabilized earth blocks.

For this work, the main aim is to study the effect of the use of the fiber, in particular the fiber of the rubber with respect to the fiberglass on the mechanical properties and the behavior of the mechanical blocks of the stabilized soil. In this context, we used the ratio of lime (12%), cement (10%) and six fiber levels (% 0.05% 0.1, 0.15%, 0.20%, 0, 25% and 0.3%) of the dry mixture.

The results indicate that the compressive strength increases with the ratio of fibers to the ratio very 0.20 for the rubber fiber and the glass fibers, a maximum, and then begins to decrease to increase the ratios of the fiber.

On the other hand, the presence of fibers has a positive effect on the mechanical behavior of the composite material, and by increasing the flexibility with respect to a remarkable refractive sensitivity of a non-fibrous material. This study also showed that the increase in stress monitoring has a positive effect on the different characteristics studied.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

la terre , la pierre et le bois ont été les premiers matériaux de construction utilisés par l'homme avec l'évolution des technique, de nouveaux matériaux ont été développés comme le béton etc. reléguant ainsi les matériaux originels au rang de " primitifs " . L'on est peu a peu arrivé à oublier les avantages de la terre comme matériaux de construction . Devant les problèmes écologiques et sociaux , on y revient progressivement . D'autre part, il est estimé à 30 la part de construction en terre dans le monde , essentiellement concentrée dans les pays dits " pauvres" la raison est simple et réside dans l'avantage économique que de telles construction offrent aux habitants de ces pays ou l'incontournable "ciment" provient pour la plupart des peuples ont encore une tradition non négligeable en matière de construction en terre ; on citera par exemple les pays comme le Yémen ,le Maroc et les pays de l'Afrique noir en général.

Eu égard à toutes ces considération , l'évolution de la technologie en matière de construction doit être une amélioration des performances et technique antérieures plutôt que leur rejet systématique. Par ailleurs , un tour dans les grands codes de dimensionnement nous révèle qu'aucun n'est relatif aux construction en terre , Même concernant les maçonneries, l'Euro code ne fait allusion qu'aux maçonneries en bloc de terre cuite et en blocs de béton .....Il est donc temps de passer à la terre crue.

Nous nous trouvons ainsi dans un contexte technologique et scientifique digne d'intérêt. Passer d'une technique de construction ne relevant que des règles empirique à un processus de dimensionnement scientifique ne doit pas être que le fruit d'un vague intuition donnant naissance à une formalisation systématique. Il faut donc suivre le cours normal de tout processus scientifique appliqué, qui inclut une grand et vaste campagne expérimentale afin de déterminer d'un manière objective et quantitative les paramètres de dimensionnement.

Il existe de nombreuses technique de construction en terre. On distingue d'un part, celles ou la maçonnerie en terre ne sert que de remplissage avec une ossature différente; c'est le cas du torchis dont l'ossature est le bois. D'autre part il ya les technique monolithiques ou la maçonnerie est une structure porteuse. On trouve dans

cette dernière catégorie le pisé (ou le mur est constitué de bandes successive de terre compactée entre deux banches de bois à l'aide d'un dame) , la maçonnerie en adobe (dont les blocs sont fabriqués manuellement dans des moule en bois et le mortier fait de boue de la même terre), la bauge(dont les éléments sont de grandes dimensions , environ 60\*60 cm<sup>2</sup> ). Ces modes de construction sont parmi les plus anciens. Récemment seulement sont apparues les maçonnerie en bloc de terre compactée ou comprimée (BTC) à l'aide d'un presse manuelle ou mécanique; en anglais on utilise le terme CEB (comperssed Erth Block). C'est cette dernière catégorie de maçonnerie en BTC qui fait l'objet de la présente thèse

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, elle permet d'avoir des blocs d'un format très souple sur le plan de la maçonnerie et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage que comme matériau principal dans un mur porteur. Pour obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques du BTC, réduction de sa porosité, variations 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.

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.

Pour une exploitation rationnelle de ces fibres dans les constructions de la région et plus précisément dans la production de blocs de terre comprimée (BTC), 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 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 du bloc de terre comprimée (BTC) avec des fibres caoutchouc

Outre l'introduction générale, cette travail est structurée en trois chapitres:

- ✓ Le premier est en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC). les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.
  
- ✓ Le deuxième chapitre est fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable de dune, le ciment, la chaux et les fibres) .
  
- ✓ Le troisième chapitre est Les résultats et les discussions de l'étude expérimentalesont donnés
  
- ✓ Enfin, une conclusion générale qui résume les principaux résultats et les perspectives à entreprendre pour les études à venir

# CHAPITRE 1 :

# SYNTHESE ET ESQUISSE SUR LES

# MATERIAUX

## **I.1 Introduction**

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle de séparation thermique entre l'ambiance intérieure et extérieure. Elle intervient comme un stockage de la chaleur dans le bâtiment et comme distributeur de cette dernière à l'air libre [1]. La terre crue parmi les éléments plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des blocs est passée par plusieurs étapes de développement dont la première, enfin la brique stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc). Dans ce chapitre, nous allons exposer les étapes de progression de la technologie de confection des différents blocs

## **I.2 la terre crue**

La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze et la muraille de Chine présente des tronçons. De nombreux monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue: forteresses marocaines, pyramides d'Egypte..... [2] Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue. Facilement mobilisable dans les régions où pierre et bois manquent, sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de matériel sophistiqué. De même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO<sub>2</sub> exceptionnel [2]. Il existe plusieurs types de terre crue entre autres nous citons :

### **I.2.1 La dobe**

#### **I.2.1.1 Définition**

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », on est une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de paille hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexibilité. Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie,

la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (photo I.1). La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25X 10 cm soit 30 X 60 X 10cm. La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen – Orient, de l'Afrique ,à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique[3,4,5] .



**Photo 1.1.***Moulage et séchage des blocs adobes*

### ***1.2.1.2 La production:***

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

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

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

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

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

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (photo 1.2), la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi ferme La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour 2 ouvriers.

### **-Moules multiples**

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion. Les moules doivent être manipulés facilement par 2 ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante. Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8 000 à 10 000 blocs par jour[6].



**Photo 1.2.***Moule de l'adobe.*

#### **b- Le mode de production mécanisé:**

La production mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux Etats Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés. Ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour.

#### **I.2.1.4. Les produits:**

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée. Les dimensions les plus fréquentes de 40 x40x15 cm ou 40x30x15 cm ,ou 40x20x10 cm....) . On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits classique, produits spéciaux, produits antisismiques[6,7]

#### **I.2.1.5. Les avantages de l'adobe:**

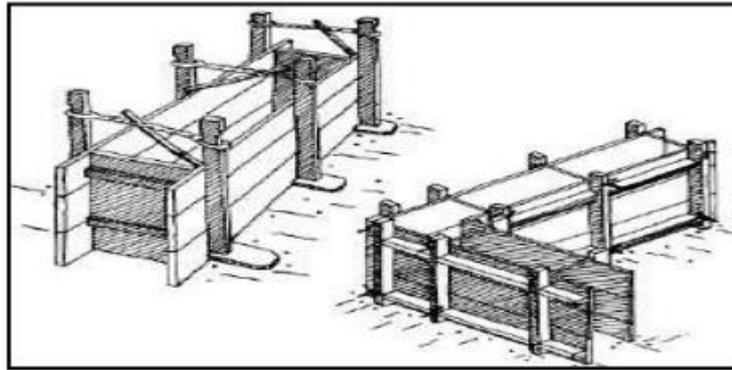
L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels sont :

- ✓ Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- ✓ D'emmagasiner la chaleur.
- ✓ Réduire la consommation d'énergie.
- ✓ De ne produire virtuellement aucune pollution.
- ✓ Construction peu couteux.
- ✓ N'entraîne pas la production de gaz[3].

### **1.2.2. Les pisés:**

#### **1.2.2.1. Définition:**

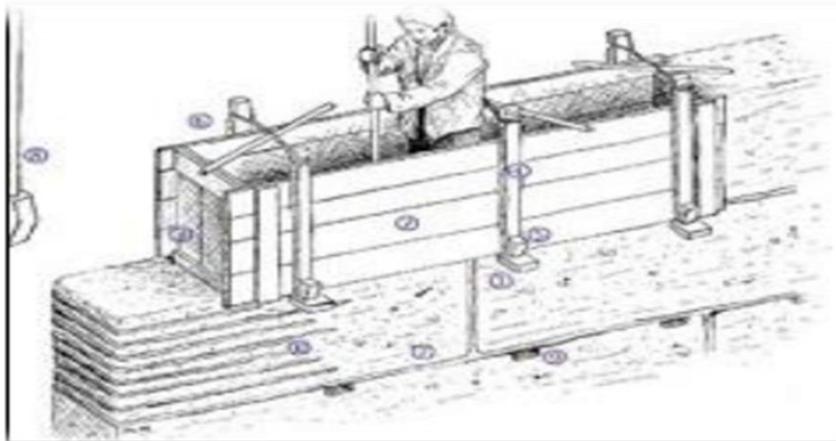
Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes[8] . Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée. (Figure1.3) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé[4].



**Figure 1.3.** Coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé.

### 1.2.2.2 Technique de production :

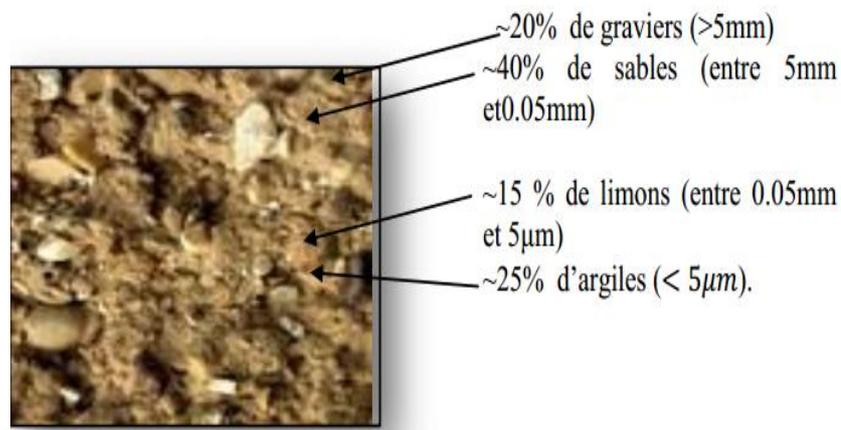
Le pisé est une technique particulière pour monter un mur en terre crue : celle-ci est compactée (à l'aide d'un pilon) dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs (figure I.4) [8].



**Figure 1.4.** Construction un mur en pisé.

Cette technique permet d'utiliser la terre généralement directement issue du site de la construction, et ne nécessite pas de transformation (pas d'utilisation d'énergie pour Altérer ses propriétés basiques) [8] . Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchée » (hauteur de coffrage)

En revanche, cette technique n'est pas applicable avec toutes les terres. En effet, la terre à pisé doit avoir une granulométrie variée : graviers, sables, limons et argiles dans des proportions bien définies, même si selon les lieux d'extraction, la matière se comportera différemment (couleur, tenue aux intempéries,...) (photo 1.5) [8]



**Photo 1.5.** Composition de pisé.

### 1.2.2.3 Les produits : différents types de pisé:

L'aspect général du matériau pisé, une fois compacté et décoffré est celui d'un "béton maigre de terre", variable selon le type de terre (apparence de graviers et cailloux ou texture plus fine), selon le type de coffrage utilisé et les principes constructifs adoptés pour édifier la maçonnerie de terre en "banchées" successives (en progression horizontale ou verticale avec des coffrages traditionnels) [6] .

### 1.2.2.4 Les Avantages de pisé:

La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- ✓ Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau
- ✓ .Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- ✓ Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- ✓ Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité a stocké la chaleur et a la restituer par rayonnement.
- ✓ Isolation phonique et qualité acoustique.
- ✓ Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire[8].

### 1.2.3. Les Blocs de terre comprimée:

#### 1.2.3.1. Définition :

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie, des dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique photos (1.6) de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. Les blocs de

terre comprimée ont généralement un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés, à relief verticale ou horizontal. Les blocs de terre comprimée sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre (gravier, sable, limon et argile) ; un additif tel que de (ciment, chaux, pouzzolane etc..) peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques final des BTC dépendent de la qualité des matières premières de ( terre, additif ) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage ,compression, cure ) [9] .



*Photo 1.6. Bloc de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle*

### **1.2.3.2. Production des blocs de terre comprimée**

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits pas compactage, exception faite de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique[5].

### **1.2.3.3. Les Avantage de bloc de terre comprimée**

- ✓ BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- ✓ BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de part son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique
- ✓ BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les

60 bars (60kg/cm<sup>2</sup>)

- ✓ BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- ✓ BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre[10].

### 1.2.3.4 Diversités des produits de blocs de terre comprimée

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Houben, 2006) (voir figure 1.7 et figure 1.8):

#### ➤ Blocs pleins

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

#### ➤ Blocs creux

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

#### ➤ Blocs alvéolaires

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

#### ➤ Blocs à emboitements

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

#### ➤ Blocs parasismiques

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

#### ➤ Blocs spéciaux

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.

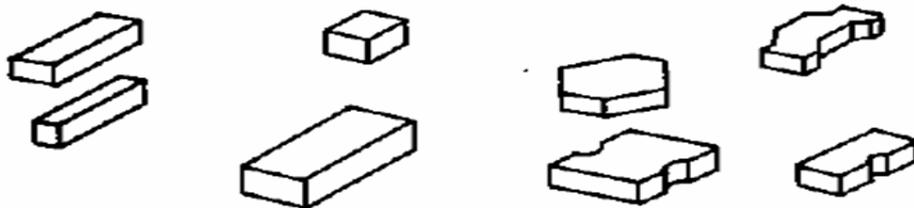


Figure I.7. Diversités des produits de blocs de terre comprimée



**Fig. 1.8 :** Différents produits de blocs de terre comprimée (Architectures des terre cure /Sophie Bronchart 2013).

**1.2.3.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde:**

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde (voir figure 1.9), profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples fascinants :Qasbah,sud(Maroc), Mosquée de Djanné (Mali), château escoffier (France) et Mausolée(Inde) .



**Fig 1.9.** Constructions réalisées en blocs de terre comprimée

### 1.3. La terre matériau de construction

#### 1.3.1 Définition

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

#### 1.3.2 Composition:

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2  $\mu\text{m}$ -0.08 mm), et les argiles (<2  $\mu\text{m}$ ). 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 constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979).

#### 1.3.3 Rappel sur les argiles

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition de roches. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillets. Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux. Dans cette partie et pour définir cette nature physico-chimique, on présente la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles.

### 1.3.3.1 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.

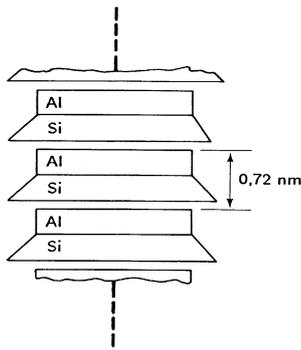
L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferrières (lépidocrocite, maghémite...). Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  (Michot, 2008).

### 1.3.3.2 Principaux types d'argiles

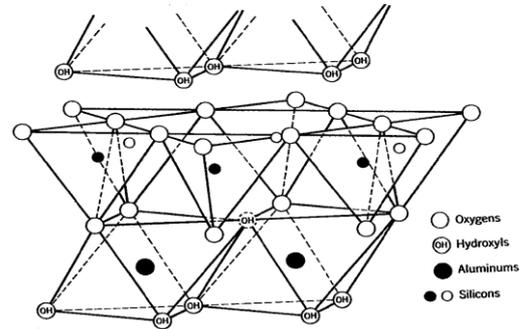
Il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

#### a. La kaolinite

Les kaolinites sont des argiles di octaédriques (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å (figure 1.10 et figure 1.11). Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les  $\text{O}^-$  présents sur la surface supérieure et les  $\text{H}^+$  de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, assurant avec les liaisons de Van der Waals une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau. Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites (association de plusieurs feuillets) (Tessier, 1984), qui résultent de cet empilement, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et qui ne permettent pas la pénétration de l'eau au sein de l'espace inter foliaire et la substitution entre les feuillets. La liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite (de quelques dizaines à quelques centaines de feuillets solidement liés l'un à l'autre) et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45  $\text{m}^2/\text{g}$ .



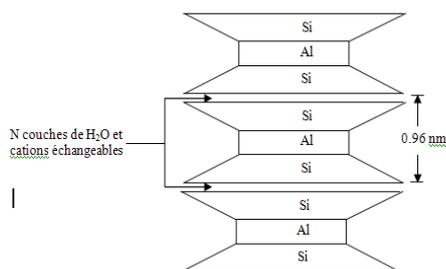
**Fig. 1.10.** Schéma de la structure de la kaolinite, (d'après Lambe,1953)



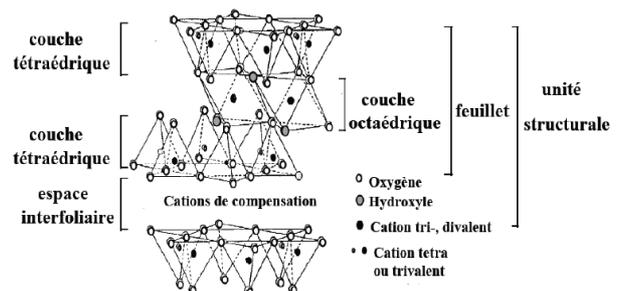
**Fig. 1.11.** Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim,1986)

**b. La montmorillonite:**

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné : chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å (figure 1.12 et figure 1.13). Ce désordre de feuillets et la constitution des faces inférieures/supérieures de ces argiles ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace inter foliaire qui s'écarte. Par conséquent, la montmorillonite est très sensible à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets. L'épaisseur du feuillet peut alors varier de 9,6 Å à 15 Å, voire plus selon la nature du cation compensateur et l'hydratation de l'espace foliaire. Les montmorillonites sont généralement calciques, plus rarement sodiques suivant la nature du cation prédominant (calcium, sodium). Il est connu que le sodium confère des propriétés de gonflement supérieures à celles permises par la présence de calcium comme cation échangeable dans une argile (Saiyouri, 1996).



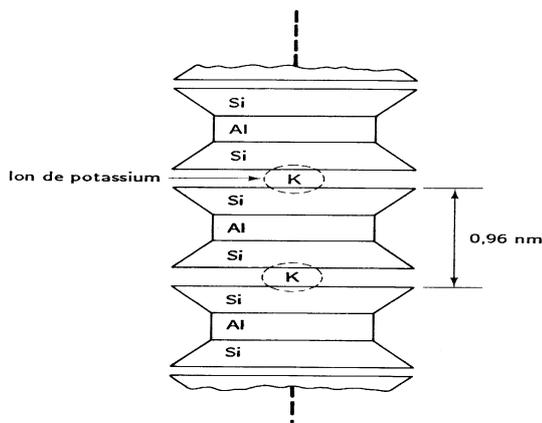
**Fig. 1.12.** Schéma de la structure de la montmorillonite, (d'après Lambe,1953)



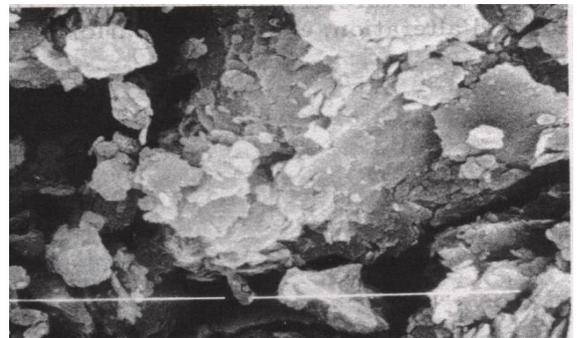
**Fig. 1.13.** Structure de la montmorillonite (Reinholdt,2001)

### c. L'illite

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite mais elle possède un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations inter foliaires de potassium  $K^+$  (figure 1.14 et figure 1.15). Les cations  $K^+$  ont la particularité de posséder exactement la même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables. Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des montmorillonites et la constitution de particules de grandes tailles.



**Fig. 1.14.** Schéma de la structure de l'illite.  
D'après Lambe, 1953.



**Fig. 1.15.** Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz, 1991)

#### 1.3.3.3 Texture ou Granularité

Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédiment métrique pour les fractions fines argileuses. Les éléments tels que les graviers et les sables sont les éléments résistants du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement (Walker, 1995). En plus, les réactions chimiques entre l'argile et la chaux (la réaction pouzzolanique) forment de nouveaux produits qui contribuent effectivement dans la valeur finale de la résistance d'une terre stabilisée à la chaux (et ciment) (Akpodje, 1985; Bell, 1996). Les silts ont une fonction intermédiaire, moins nette.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et réfère aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante (Houben, 2006):

- Cailloux : 200 mm - 20 mm
- Graviers : 20 mm - 2 mm
- Sables grossiers : 2 mm - 0.2 mm
- Sables fins : 0.2 mm - 0.06 mm
- Silts : 0.06 mm - 0.02 mm
- Silts fins : 0.02 mm - 0.002 mm
- Argiles : .002 mm - 0 mm

#### 1.3.3.4 La plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité LP, l'indice de plasticité IP). Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols (Burrough, 2001).

Pour un sol à gros grains, ou pour un sol à grains fins contenant une faible teneur en argile, une faible augmentation de l'humidité au-dessus de la limite plastique détruit les forces d'attraction, qui fournissent la résistance au cisaillement. Cela signifie que la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquide est faible, et l'indice de plasticité est également faible. Alors que, pour un taux élevé d'argile dans un sol, il faut une importante quantité d'eau pour détruire les forces d'attractions. Dans ce cas, l'indice de plasticité est élevé. Ainsi, l'indice de plasticité est un moyen indirect pour mesurer les quantités et les affinités de l'humidité de l'argile dans le sol. Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent (USACE, 2000).

#### 1.3.3.5 La compressibilité:

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée

et moins l'eau pourra y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau. La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et, de ce fait, incompressibles. L'essai Proctor, l'essai le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté est beaucoup plus adapté aux sols pulvérulents.

#### **1.3.3.6 La cohésion:**

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de  $\Phi < 2 \text{ mm}$ ) qui lie les grains inerte entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante (Houben, 2006):

- Mortier Sableux,
- Mortier Maigre,
- Mortier Moyen,
- Mortier Gras,
- Argiles.

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

### **1.4 Stabilisation:**

#### **1.4.1 Définition:**

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (United Nations, 1992). Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

### 1.4.2 Objectifs

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

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

### 1.4.3 Procédés

On dénombre trois procédés de stabilisation (Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992, Webb, 1994) :

#### 1.4.3.1 Stabilisation mécanique

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

#### 1.4.3.2 Stabilisation physique

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

#### 1.4.3.3 Stabilisation chimique

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité (Akpodje, 1985).

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

- a. Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).

- b. Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari,1989).

**1.4.4 Moyens de stabilisation**

Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon Rigassi (Rigassi,1995), il y a six modes de stabilisations :

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

Chaque stabilisant n’agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (Houben,2006) (tableau 1.1)

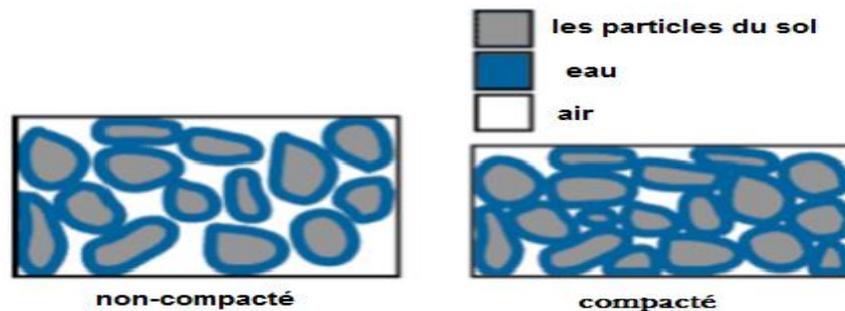
**Tableau 1.1** : Moyens de stabilisation des terre remaniées (Houben,2006)

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

**1.4.5 Densification par compression**

Le compactage est une opération qui s’accompagne d’une réduction du volume des vides dans un sol (figure 1.16) (De Jong-Hughes, 2001), donc une densité sèche plus importante. On constate, pour tous les matériaux, une relation très nette entre la densité sèche et la résistance mécanique.

Celle-ci est d'autant plus élevée que le matériau est compact (Ausroads , 1998). C'est ainsi que, pour une même composition et un même dosage, un béton est d'autant plus résistant qu'il est dense ; de même les pierres les plus denses ont les résistances mécaniques les plus élevées. C'est également le cas pour les terres ; toutefois pour ces dernières, les densités que l'on peut obtenir demeurent relativement faibles. La figure 1.14 représente qualitativement l'évolution de la résistance en compression  $\sigma'$  en fonction du poids spécifique sec  $\gamma_d$  pour ces trois familles de matériaux. L'analyse de ces courbes montre tout l'intérêt que représente un accroissement de  $\gamma_d$ , particulièrement pour les fortes valeurs de densité (Doat, 1979). Un autre avantage de la densification est la diminution de la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau stabilisé et curé, ce qui influe favorablement sur la durabilité. Mais on doit veiller au cours du processus de compactage à ce qu'il reste assez d'eau pour que l'hydratation des minéraux du sol et de la chaux ou de ciment (ajoutés comme stabilisants) se fasse dans des conditions normales (Winterkorn , 1975) .



**Fig. 1.16.** Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).

#### 1.4.6 Méthodes de compression

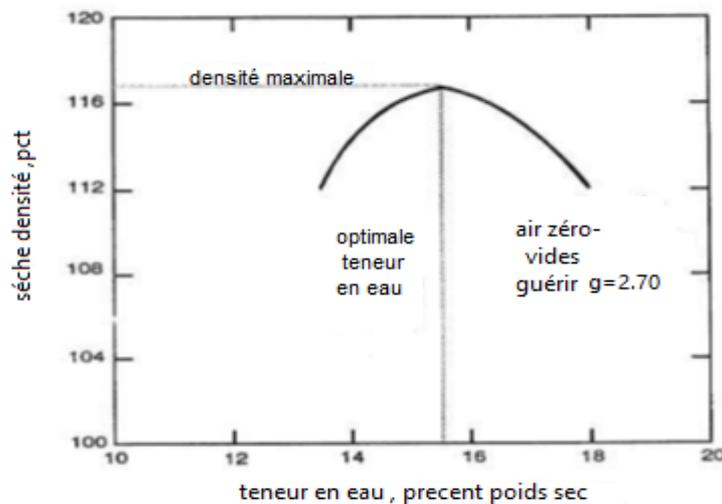
La méthode de densification influe fortement sur la résistance finale du matériau (Doat, 1979). Il existe principalement quatre méthodes de compactage (Houben, 2006) :

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

##### 1.4.6.1 Influence de la teneur en eau sur la densité

La densité d'un sol de terre comprimée dépend de plusieurs variables physiques : la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. Cependant, les propriétés de la terre comprimée sont plus influencées par la teneur

en eau que par tout autre paramètre (Burrough,2001). Presque tous les sols présentent une relation similaire entre la teneur en eau et la densité sèche lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de compactage donnée (figure 1.17)(USACE, 2000). La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice des vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale. Un sol 'trop sec' sera le siège de frottements importants entre les grains de sol. Un sol trop humide, par contre sera moins susceptible d'être compacté car une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol.

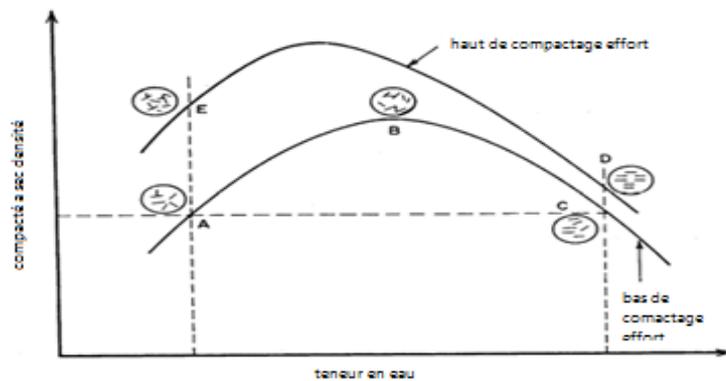


**Figure 1.17.** Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).

La détermination de la teneur en eau optimale TEO est faite en laboratoire. En géotechnique routière, la recherche de la TEO est obtenue à l'aide de l'essai de Proctor, qui applique un compactage dynamique est mieux adapté aux sols pulvérulents. Cet essai n'est pas conseillé pour les sols argileux, car il entraîne une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en terme de densité (P'Kla,2002).Des études (Mesbah,1999), montrent qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. De ce fait l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des briques compressées. En effet, d'autres part, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il semble ne pas exister de relation entre l'« énergie Proctor » et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs (Olivier, 1986).Il vaut mieux insister sur la démarche la plus correcte et aussi utilisée sur chantier, qui est de trouver la teneur en eau optimum avec la presse à bloc directement (CDE,2000).

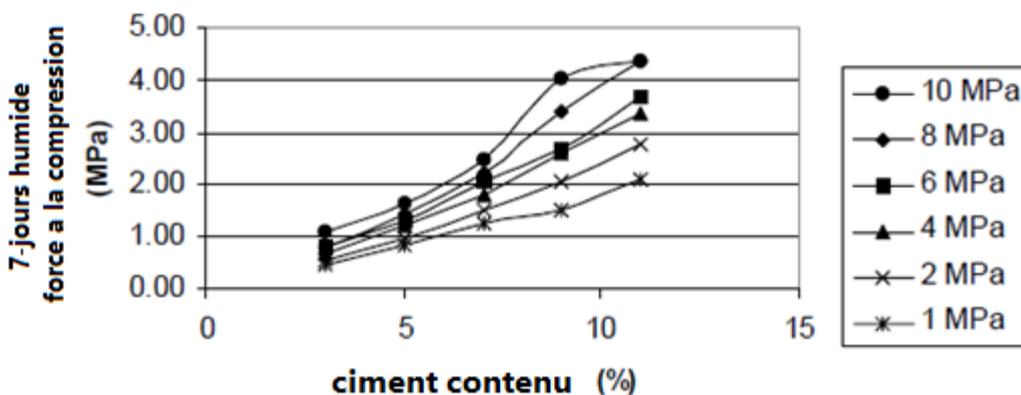
**Influence de l'énergie de compactage**

Quel que soit le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale TEO et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la figure 1.18(Bergado, 1996 ; Winterkorn, 1975; USACE, 2000). Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués (Houben,2006).



**Fig 1.18.** Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).

L'étude menée par Gooding (Gooding,1993), a montré que l'augmentation de la contrainte de compactage a un grand effet sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisée au ciment (figure 1.19). Dans le même contexte, les résultats des travaux de Guettala et al (Guettala,2002), montrent que les résistances mécaniques augmentent avec l'augmentation de la contrainte de compactage jusqu'à un optimum de 17.5 MPa. Mais au-delà de cette valeur il y a une chute de la résistance de l'ordre de 7% pour une contrainte de compactage de 20 MPa(figure 1.20).



**Fig. 1.19.** La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding,1993).

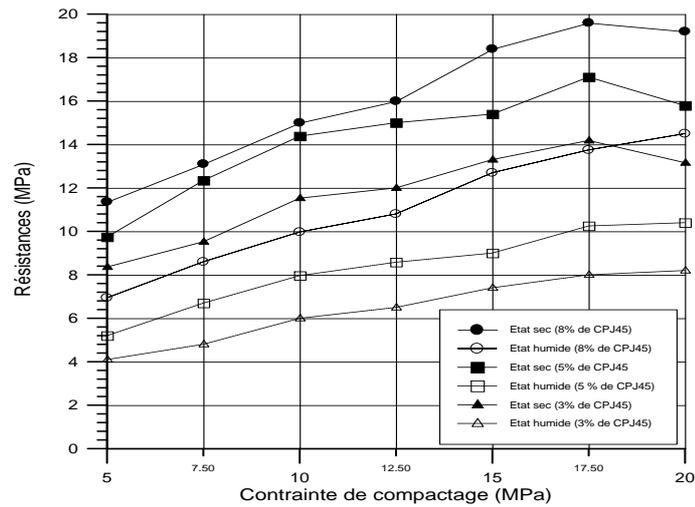
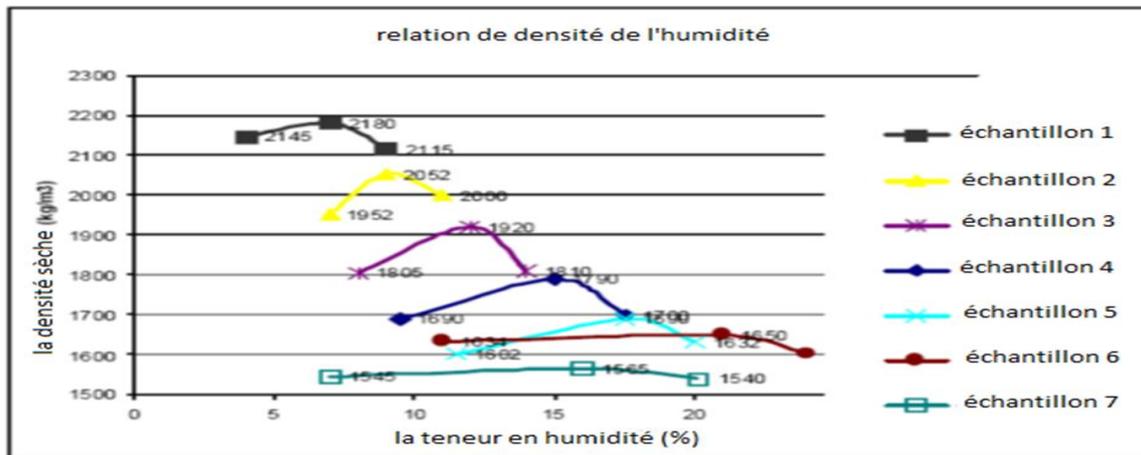


Fig.1.20. Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).

1.4.7 Influence de la granularité du sol

Les granularités étroites ne permettent pas d'atteindre une forte compacité : la courbe de compactage est aplatie avec un maximum peu accentué (figure 1.21) (USAGE, 2000). Les granularités étalées, caractéristiques de matériaux dont les grains ont des grosseurs variées, donnent par contre, des courbes de compactage à maximum accentué : la compacité obtenue est meilleure. Un mélange d'éléments fins et grossiers devrait donc permettre l'obtention de produits compactés plus denses que ceux obtenus avec des sols exclusivement composés d'éléments fins (USAGE, 2000 ; Doat, 1979).

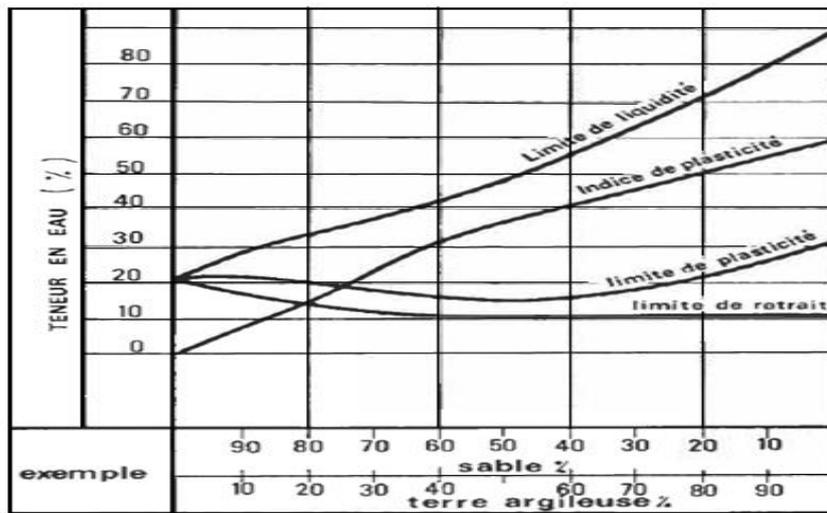


échantillonner No.	description	%		LL	PI
		sable	argile / silt		
1	sable limoneux bien calibrés	88	12	16	NP
2	loam sableux bien calibrés	72	28	16	0
3	med-graduée loam sableux	73	27	22	4
4	maigre argilo-limoneux sableux	32	68	28	9
5	loessial silt	5	95	26	2
6	argile lourde	6	94	67	40
7	sable très mal classés	94	6	NP	

Fig. 1.21. La relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol (USAGE, 2000).

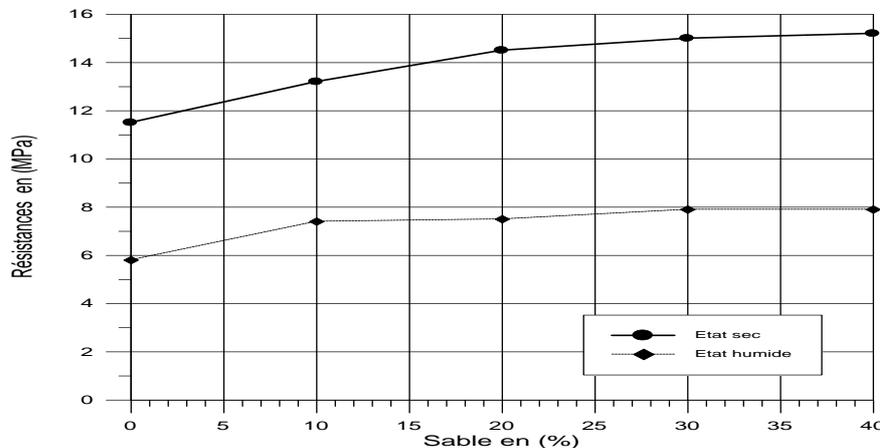
**1.4.8Densification par gradation**

Pour obtenir la meilleure résistance d’une terre, tant aux sollicitations mécaniques qu’à l’action de l’eau, il faut réduire la proportion des vides et multiplier les contacts entre les grains (Houben,2006).Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire.Il est possible de corriger une teneur trop forte ou trop faible en graves, en sables ou en fines. Un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant qu'un sol trop peu plastique le sera par apport de fines. La figure 1.22 présente les variations de plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange sable-argile pour différentes proportions de sable et d'argile(Doat,1979).



**Fig 1.22.** Evolution des limites d’Atterberg avec la teneur ensable(Doat,1979).

D’après Guettala (Guettala, 2003), les résistances à la compression à l’état sec et humide augmentent en fonction de la concentration en sable (figure 1.23). Á titre d’exemple, pour 30 % de teneur en sable, la courbe montre qu’il y a une évolution de la résistance à l’état sec et à l’état humide de l’ordre de 24% et 28 % successivement.



**Fig 1.23.** Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte

## 1.4.9 Stabilisation au ciment

### 1.4.9.1 Généralités

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment (Houben, 2006). Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses ( $> 30\%$ ) (Houben, 1996).

D'après Venuat (Venuat, 1980), tous les ciments normalisés conviennent en principe pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Alors que d'autres auteurs (Doat, 1979), préconisent un type de ciment selon la nature du sol :

- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite  $C_3S$  et bélite  $C_2S$  qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite,  $Ca(OH)_2$ . Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ( $I_p < 25\%$ ) (Verdeyen, 1971).

### 1.4.9.2 Mécanisme de stabilisation

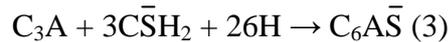
La poudre de ciment contient plusieurs phases différentes. Les phases principales sont: l'alite ( $C_3S$ ), la bélite ( $C_2S$ ), l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ), l'aluminoferritetétracalcique ( $C_4AF$ ) et la péri clase ( $MgO$ ). Des phases mineures sont également trouvées: la chaux libre ( $CaO$ ), les sulfates de sodium et de potassium ( $Na_2SO_4$  et  $K_2SO_4$ ) (Moszkowicz, 2001). Suivant les proportions de ces éléments, les ciments pourront avoir des propriétés différentes. Par exemple, une forte teneur de  $C_3S$  donnera une résistance élevée, par contre un ciment à forte teneur en  $C_3A$  aura une faible résistance à l'action des eaux agressives.

Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de

l'hydratation des deux silicates de calcium ( $C_3S$  et  $C_2S$ ) qui forment deux nouveaux composés: la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H :  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ ) :

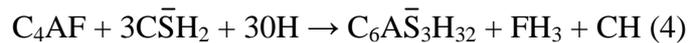


L'hydratation des aluminates tricalciques ( $C_3A$ ) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



En l'absence de gypse, les  $C_3A$  réagissent avec l'eau pour donner des  $C_4AH_{13}$ ,  $C_2AH_8$ , et des  $C_3AH_6$ . Les  $C_4AH_{13}$  et  $C_2AH_8$  sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en  $C_4AH_8$ .

La phase ferrite ( $C_4AF$ ) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols (Tran, 2009). Pour le cas des sols pulvérulents, leurs particules ont des tailles plus grandes que celles des grains de ciment, donc elles peuvent être revêtues de ciment. Le ciment peut réagir avec lui-même ou avec le squelette granulaire du sable (United Nations, 1992). Dans le cas des sols cohérents, beaucoup de particules sont plus fines que les grains de ciment, donc elles ne peuvent pas être revêtues par du ciment (Bell, 1975). Cependant, suite au compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui sera de plus en plus résistant à mesure que l'hydratation avance, menant à l'augmentation de la résistance.

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit (United Nations, 1992):

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

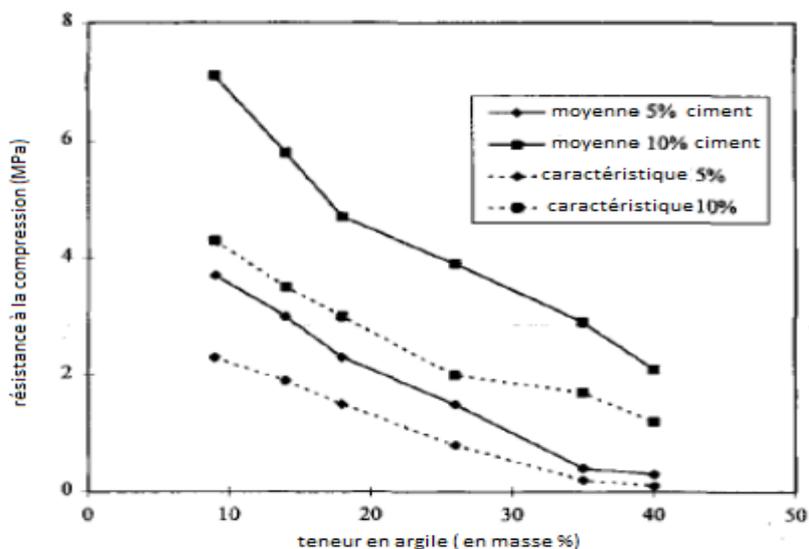
Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment (Vénuat, 1980).

Il en résulte en fait trois structures mêlées (Houben, 2006) :

- une matrice inerte sableuse liée au ciment,
- une matrice d'argile stabilisée,
- une matrice de terre non stabilisée.

### 1.4.9.3 Efficacité et dosage

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des limons et des argiles (Houben, 2006). Ceci confirme les résultats obtenus par Walker (Walker, 1997). Ces résultats montrent que la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment diminue avec l'augmentation de teneur en minéraux argileux (figure 1.24).



**Fig . 1.24.** Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).

En général, il faut au moins 5 à 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. La résistance en compression reste très dépendante du dosage, 8 % de ciment constituent souvent une limite supérieure économiquement acceptable (Doat, 1979).

D'après Gooding (Gooding, 1993), le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12% en masse de ciment, semble être le bloc le plus courant.

Heathcote(Heathcote, 1994), montre que la teneur minimale en ciment est 0,75%, au-dessous de laquelle, la résistance est indépendante de la quantité de ciment employée. Mais les résultats de l'auteur ne concordent pas avec ceux d'autres chercheurs exigeant une valeur comprise entre 5 et 12% pour être le mieux adapté. Par exemple, (Walker, 1995) indique que les blocs à base de moins de 5% de ciment sont souvent trop friable pour être manipulés. Plus tard Walker (Walker, 1996) reconnaît que la teneur en argile du sol doit être comprise entre 5 et 20%, la teneur en ciment entre 4 et 10% et l'indice de plasticité du sol entre 2,5 et 30%.

#### **1.4.10 Stabilisation à la chaux**

##### **1.4.10.1 Généralités**

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité. Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes (Jarrige, 1989).

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

- La chaux vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).
- La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO<sub>2</sub> de l'air.
- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau. Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques (Doat, 1979). La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant IP > 17 et LL > 40.

La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges (Le Roux, 1969) ; (Gresillon, 1976). Le Roux (Le Roux, 1987) a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90

jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme.

#### 1.4.10.2 Mécanismes

Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux ; l'échange cationique, la floculation et l'agglomération des argiles, la carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques entre la chaux, la silice et/ou l'alumine (Choquette, 1988; Locat, 1990; Roger, 1996a). Dans un premier temps, les deux premières réactions augmentent la plasticité, la maniabilité ainsi que la résistance du sol et réduisent typiquement l'indice de plasticité tel qu'illustré sur la figure 1.25. Cette première phase est reconnue comme étant la période de modification du sol.

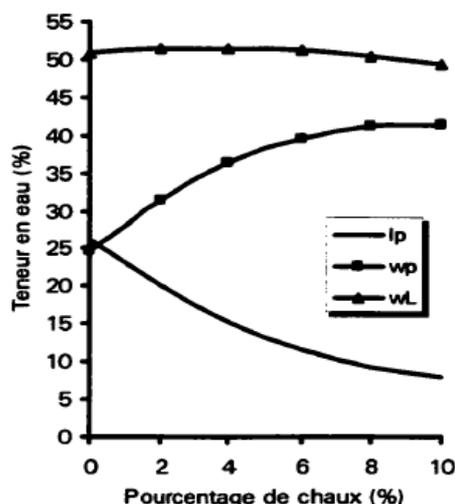


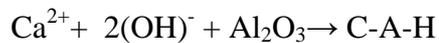
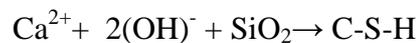
Fig. 1.25. Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979)

La deuxième phase est celle de la stabilisation qui englobe le troisième et quatrième type de réaction. Cette période entraîne une cimentation du produit qui augmente progressivement la résistance au cisaillement et la durabilité du sol. Il est reconnu qu'une température inférieure à 13 °C peut décélérer le processus de stabilisation alors qu'une température plus élevée l'accélère (Moore, 1987).

En utilisant de la chaux vive, la diminution de la teneur en eau sera plus forte en raison de la chaleur dégagée par la réaction (réaction exothermique). Quoiqu'il en soit, la chaleur dégagée par la réaction soit en grande partie responsable de l'évaporation de l'eau, le malaxage peut également provoquer une aération qui, elle aussi, est bénéfique à l'évaporation. Un apport de matériaux secs peut aussi contribuer au processus d'assèchement.

**a. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques**

La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques sont les deux réactions secondaires responsables de ladite stabilisation. La carbonatation de la chaux est la réaction entre cette dernière et le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium (Choquette, 1988). Le calcium augmente le pH du sol augmentant ainsi la solubilité et la réactivité de la silice et de l'alumine présentes dans les particules d'argile (Herzog, 1963). Les ions de calcium s'associent à l'alumine et à la silice pour former des agents de cimentation (équations 8 et 9) (Moore, 1987). Ces produits sont donc des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) (Choquette, 1988).



Les réactions pouzzolaniques peuvent se produire lentement, pouvant s'échelonner sur plusieurs mois et même des années. Durant cette période, le sol gagnera de la résistance en cisaillement et la plasticité sera diminuée. Pour qu'une réaction pouzzolanique ait lieu, le pourcentage d'argile doit être >20% et la somme d'argile et de silt doit être >35 % (Broms, 1991). A défaut d'atteindre ces valeurs, il n'y aura pas suffisamment de silice ni d'alumine disponibles pour les réactions pouzzolaniques. Par contre, même si une stabilisation n'a pas lieu, une modification du sol peut être atteinte par le biais de la floculation et de l'agglomération.

**1.4.10.3 Efficacité et dosage**

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. L'gain en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la grosseur des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement (Locat, 1990; Moore, 1987; Rogers et al, 1996b).

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un braisage des mottes. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre (Houben, 2006).

Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile, et à travers la réalisation d'éprouvettes traitées à la chaux et compressées, Toubeau (Toubeau,1987) a pu suivre l'évolution des réactions sol-chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part, sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude, lui a permis de faire un classement, de favorables au moins favorables dans l'ordre : kaolinite, > illite, >semectite.

#### **1.4.11 Stabilisation par fibres**

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terrepaille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (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.

### **1.5 Généralités sur les fibres**

#### **1.5.1 Introduction**

Les bétons de fibre sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction, on appelle béton, le matériau constitué par le mélange , dans des proportions convenables, de ciment, de granulats (sables, gravier) et d'eau. Le béton armé, le matériau obtenu en enrobant dans du béton des aciers disposés de manière à équilibrer les efforts auxquels le béton résiste mal par lui-même, c'est à dire les efforts de traction ou renforcer le béton pour résister aux efforts de compression s'il ne peut, à lui seul, remplir ce rôle, il est renforcé parfois par des fibres de différentes natures qui donnent des matériaux composites.

#### **1.5.2 Historique et perspective de l'utilisation des fibres**

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

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

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

### **1.5.3 Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction**

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

- a. Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
- b. Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes) ;
- c. Les fibres minérales (amiante, verre, carbone) ;
- d. Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier) ;
- e. Les fibres animales (poil, laine, soie) Le tableau 1,2 ci-dessous donne quelques caractéristiques des différentes fibres utilisées.

**Tableau 1.2.** Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre en $\mu\text{m}$	Densité en ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	80	1,5-3	2-3,5
Polypropylène	10,200	0,9	5-10	0,4-0,75	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	200	3	2,3
Polyester	-	1,4	8	0,7-0,85	11-13
Carbone	5-9	1,7-2,0	250-400	2-3	0,5-1,5
Cellulose	14-45	1,5	20-40	0,15-0,5	8-12
Jute	18-2000	1,45	-	0,35	3-4
Sisal	10-50	1,5	15,2	0,8	3
Coir	20-700	1,08	2.8	0,17	37.7

D'après, DEBICKI a résumé sur le tableau (1.2) quelques propriétés de fibres industrielles. Il met en évidence la nature très variée de ces fibres

### 1.5.4 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 1.26)(Baley, 2013)[...] :

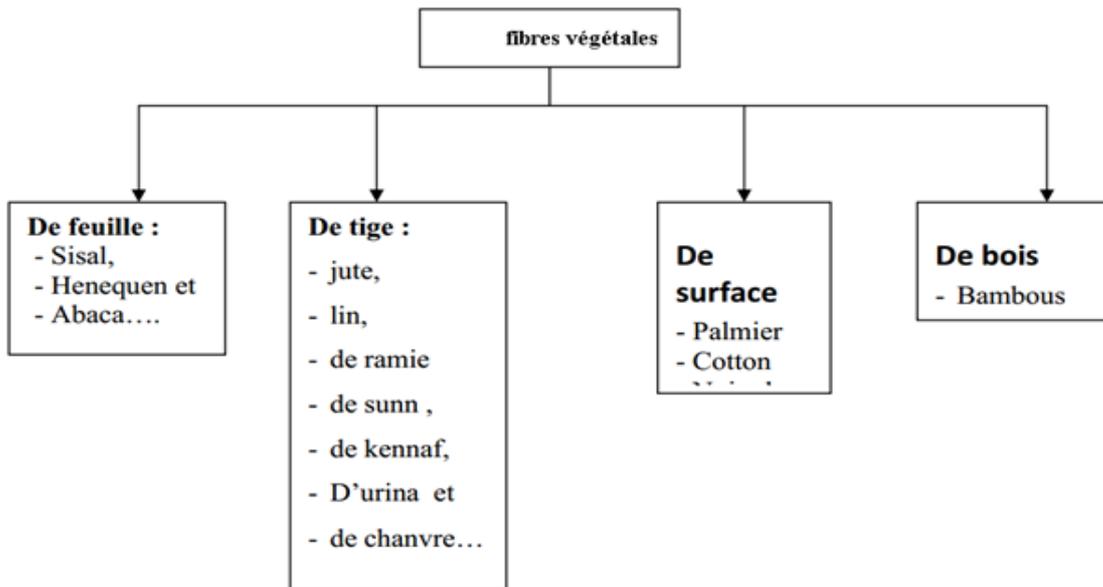
#### b. Les fibres végétales

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

Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales [9] Actuellement le monde connaît de récents développement dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientés vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales

### 1.5.5. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (figure 1.27) : les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface



**Fig1.27.** Les classes des fibres végétales

1. Les Fibres de feuilles Ces fibres sont dures et rigides; les fibres de feuille les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca De ce fait, plusieurs chercheurs tels que : NILSSON et AYYAR et al. ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuille.
2. Les fibres de tiges Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de coir et en toute longueur, séparées individuellement par un processus de défilage. Une fois séparées, elles sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de Sun, de kenaf, de urena et de chanvre
3. Les fibres de bois Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.
4. Les fibres de surface Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco [

Par ailleurs, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres .

### 1.5.6. Les fibres de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc sont extraites des roues des voitures et ce, pour une utilisation dans plusieurs domaines tels que la construction voir fig1.28



**Fig.1.28.**Fibres des pneus de caoutchouc

Les fibres de caoutchouc utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de matériaux polymères usés. La ferraille Fibre de caoutchouc. Ces fibres se reproduisent en éliminant les vieux pneus en bandes de 150 mm et plus petites, puis Broyé en ferraille. La longueur des fibres de caoutchouc utilisées était comprise entre 20 et 40 mm. Leur L'épaisseur et la largeur étaient d'environ 0,25 mm et 0,35 mm respectivement **fig1.28**. Les spécifications du produit de Les fibres polymères sont données dans le tableau (1.4) suivant:

**Tableaux1.3.** *Propriétés physiques et techniques des fibres*

Type de polymère
Longueur (mm) 20-40 mm
Section rectangulaire
Epaisseur (mm) 0,25 mm
Largeur (mm) 0,35 mm
Densité ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ) 1,15

### 1.5.6.1 Le caoutchouc

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. (Figure 1.29)

Le broyage peut être mécanique ou cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé. La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti fissures à usage routier ou de membranes anti vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes... Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti.



**Fig1.29.**:Aspect des poudrettes de caoutchouc

### 1.5.6.2. Poudrette de caoutchouc

Afin d'assimiler les termes utilisés dans l'industrie du pneu, voici un bref historique sur le développement des caoutchoucs naturels et synthétiques. Le caoutchouc naturel provient de plantes diverses, la source la plus importante étant l'arbre à gomme (Hevea brasiliensis). Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est produit chimiquement à partir de produits pétrochimiques. Les matériaux bruts utilisés dans la fabrication des caoutchoucs synthétiques sont les suivants:

- Isobutylène.
- Isoprène.

- Styrène.
- Butadiène.

En 1994, au niveau mondial, la quantité de caoutchoucs utilisés pour les applications industrielles se situait autour de 12 800 kilotonnes, dont 35% étaient constitués de caoutchouc naturel, et 35% de caoutchouc synthétiques. Le 30% restant consiste en des composites destinés à des applications spécialisées, un sujet qui ne sera pas abordé dans ce document. La figure 3.1 illustre sommairement l’historique du caoutchouc. Acrylonitrile.

**1.5.6.3. Les caractéristiques des granulats de caoutchouc**

D’une manière générale, il est possible de caractériser un granulat de caoutchouc par un certain nombre de propriétés ( voir figure (1.30) et tableau (1.5)):

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.
- Morphologie des particules.
- Composition chimique des particules.
- Energie de surface des particules



Granulés de 4 à 5mm

Granulés de 2 à 4mm

Granulés de 0.5 à 2mm

Granulés inférieur à 0.5mm

**Fig1.30.** Les différents diamètres des granulats des pneus usés après broyage.

(Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés)

**Tableau 4 :** Distribution granulométrique pour les trous de filière de Ø20 mm et Ø16 mm

(Technique et procédés KAHL pour le recyclage des pneus usagés).

Ø20 mm	4 à 6 mm~ 25%	2 à 4 mm~ 25%	0 à 2 mm~ 45% à 50%
Ø16 mm	4 à 6 mm~ 20%	2 à 4 mm~ 20%	0 à 2 mm~ 55% à 60%

### 1.5.7. Fibres artificielles :

#### 1.5.7.1 - Les fibres de verre:

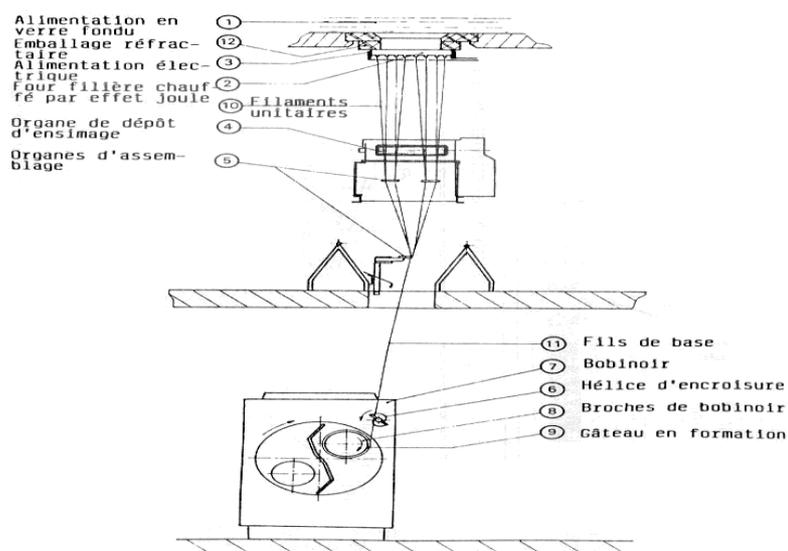
Le verre utilisé comme renfort dans les composites se présente généralement sous forme de fils (simples, tressés, tissés...). Bien que les fils de verre ainsi obtenus (verre textile) n'aient trouvé une application dans l'industrie textile qu'aux environs de 1930, c'est avec l'avènement des premières résines thermodurcissables que le verre textile trouve son domaine d'application privilégié. Il connaît dès lors d'incessants développements dans le vaste domaine des matériaux composites auxquels il apporte ses propriétés mécaniques, physiques, chimiques ou électriques.

##### ▪ Le principe de fabrication de la fibre de verre:

Les fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes : les fibres d'isolation (souvent désignées sous le nom de "laine de verre") et les fibres textiles. Elles sont destinées à des usages très différents. La composition des fibres de verre est constituée principalement de silice, de chaux et d'alumine.

##### ▪ Elaboration du verre:

Les matières premières proviennent de carrières sélectionnées pour leur richesse en silicates. Elles sont ensuite très finement broyées et stockées dans des silos. Il s'en suit un dosage très précis de ces matières premières qui sont homogénéisés avant introduction dans le four de fusion aux environs de 1550°C. Pendant longtemps, le verre fondu en sortie du four était façonné sous forme de billes (procédé "Billes") pour en subir par la suite une seconde fusion dans des filières chauffées. Cette technique fortement consommatrice d'énergie est remplacée par le procédé dit de "fusion directe" dans lequel le verre fondu dans le four alimente directement les filières comme le montre la figure (I.31)..



**Fig 1.31.** Procédé d'étirage du verre par le procédé "fusion directe". Document :

VetrotexSaintGobain [1]

▪ **Fibrage du verre**

Les filières de fibrage sont généralement de forme prismatique réalisées en alliage "Platine-Rhodium" et chauffées à 1250°C. Elles sont percées à leur base d'un certain nombre d'orifices calibrés d'environ deux millimètres de diamètre. Dès sa sortie de filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse (10 à 60 m/s) et refroidi ce qui permet d'obtenir suivant le type d'étirage (mécanique ou pneumatique) :

- Un ensemble de filaments continus, parallèles, légèrement liés ensemble (fil de base) appelé : "Sillionne".
- Un ensemble constitué de filaments discontinus légèrement liés ensemble (ruban) et disposés parallèlement appelé "Véranne".

Le diamètre et le nombre de filaments déterminent la masse linéique ou "titre du fil" exprimée en Tex ( $1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ Kg/m}$ ).

▪ **Ensimage des fils de verre**

L'ensimage est déposé sur les filaments de verre largement étalés peu de temps après leur sortie de filière alors que la température du verre est encore d'environ 100°C. L'ensimage du verre a pour objet d'assurer les fonctions suivantes :

- cohésion entre les filaments
- donner une certaine raideur au fil
- protection des filaments de l'abrasion
- éliminer les charges électrostatiques
- favoriser la liaison verre-matrice

Suivant l'utilisation ultérieure des fibres de verre, l'ensimage peut être de divers type (textile, plastique,...). La quantité d'ensimage déposé sur les fibres est généralement faible (de 0,3 à 3%) et sa composition est fonction de son utilisation. Composition et propriétés mécaniques des verrestextiles: Il existe sur le marché plusieurs types de fils de verre possédant chacun une formulation et une désignation spécifiques et dont les principaux usages et compositions moyennes sont représentés dans les tableaux I.5 et I.6.

Comme caractéristiques mécaniques de référence, les valeurs représentées au tableau 1.5 sont celles des mesures sur filament vierge en sortie de filière de fibrage. Ces caractéristiques peuvent néanmoins chuter avec :

- la température d'essai : chute de 50 % pour le verre E à 500°C
- le vieillissement : facteur humidité – température

**Tableau 1.5.** Usages des principaux types de verre

Different types de verre	Usages du verre
E	le plus utilise
D	à haute propriétés diélectriques
C	resistant aux acides
R,S	à performances mécaniques
AR	alkali-résistant, spécialement conçu pour le renforcement des ciments

**Tableau 1.6.** Principales propriétés mécaniques de quelques types de verre

Caractéristiques	Unités	Verre E	Verre R,S	Verre AR (Cem-Fil)
Contrainte de rupture en traction	GPa	3,4	4,4	1,5 - 3,5
Module d'Young	GPa	73	86	72 – 80
Allongement à rupture	%	4,6	5,3	2,5
Coefficient de poisson	/	0,22	/	/

**Tableau 1.7.** Compositions de quelques types de verre

Constituents (en %)	Type de verre				
	E	D	C	R,S	AR
Silice (SiO <sub>2</sub> )	55	74	65	65	71
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15	-	4	25	1
Chaux (CaO)	21	] 0,5-0,6	14	-	-
Magnésie (MgO)	-		3	10	-
Oxyde de bore (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7	23	5	-	-
Alkalis (Na <sub>2</sub> O ; K <sub>2</sub> O ;...)	2	1,5	9	-	11
Oxyde de zirconium (ZrO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	16
Oxyde de lithium (Li <sub>2</sub> O)	-	-	-	-	1

- **L'interface**

C'est la zone de contact entre la fibre et la matrice à travers laquelle se réalise le transfert de charge de la matrice à la fibre. Elle joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique du composite. La morphologie de cette zone de transition interrassiale dépend du type, de la géométrie et du traitement de surface des fibres, de la composition de la matrice et du procédé d'élaboration du composite. Selon Bentur et al comme rapporté dans le travail de thèse de Mausole A.D, la taille de la section des fibres influence considérablement la microstructure de l'interface fibre-matrice :

- ✓ Pour les microfibrilles, les fibres ayant un diamètre inférieur ou égal à celui des particules de ciment ( $\leq 70\mu\text{m}$ ), la microstructure de l'interface est dense, peu différente de celle de la matrice. Les diamètres des fibres et les particules de ciment sont de même ordre de grandeur
- ✓ Pour les fibres en faisceau comme le cas des fibres de verre, les particules de ciment et les hydrates formés ne pouvant pénétrer dans le faisceau, la microstructure autour du filament se différencie selon son positionnement interne ou externe.
- ✓ Pour les macro-fibrilles, les fibres ayant un diamètre supérieur à celui des particules de ciment, la microstructure de l'interface ressemble à celle
- ✓ de l'auréole de transition des granulats dans le béton. Sa formation est due à un effet de paroi et de ressuage au niveau de l'interface.

Les performances des matériaux composites dépendent étroitement de cette zone et donc de la liaison fibre-matrice. Cette liaison est établie par des interactions existantes entre les deux constituants. La figure I-4 schématise la position de l'interface. Les paramètres qui gouvernent cette liaison sont nombreux. Celle-ci dépend aussi bien de la nature, de l'intensité et du nombre de liaisons interrassiales, que de la structure des constituants et des défauts qui se créent à l'interface.

Ce phénomène a été étudié surtout sur les polymères, et il en ressort deux types d'adhésion.



**Fig 1.32.** Représentation schématique d'une interface

### 1.5.7.2. L'adhésion mécanique interface

La théorie de l'adhésion mécanique se base sur l'état de surface du constituant fibreux. Ce qui suppose que ce dernier doit présenter une certaine rugosité pour permettre de créer localement des micro-assemblages mécaniques.

### 1.5.7.3 L'adhésion physico-chimique

L'adhésion physico-chimique, résultant de liaisons intermoléculaires comprend de nombreux modèles théoriques :

- Couplage chimique : fondé sur le principe de l'existence de liaison chimique mettant en commun une paire d'électrons entre deux atomes.
- Couplage physique (diffusion + absorption): deux éléments chimiquement ou isotopiquement différents mis en contact s'interpénètrent l'un dans l'autre ce qui constitue l'adhésion par diffusion tout en remplissant les critères thermodynamique et cinétique. L'adhésion par absorption repose sur le mouillage des constituants et se caractérise par un contact liquide-solide où le potentiel électrocinétique a une importance particulière sur la capacité d'absorption ( par filtration, dispersion, coagulation.....).
- Modèle électrostatique.

Dans le cas des fibres de verre et pour réaliser technologiquement une bonne adhérence fibre –matrice, deux méthodes sont utilisées :

- le traitement de surface "ensimage".
- Le dépôt d'un polymère à la surface de la fibre.

### 1.5.7.4 L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols

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

Le principe de la stabilisation du sol est une action de la nature, on peut le voir à travers la présence des racines des plantes dans les sols. Les fibres qui forment ces racines pénètrent et s'orientent dans le sol de façon aléatoire. Ces fibres améliorent la résistance du sol et la stabilité des pentes naturelles (Kaniraj,2003). Par conséquent, le concept de stabilisation par des fibres a été reconnue il ya plus de 5000 ans. Par exemple, les civilisations anciennes mélangent la paille dans le matériau terre afin de créer des blocs de construction renforcés (Abtahi, 2009). Il existe plusieurs exemples de renforcement du sol comme la Grande Muraille de Chine (premier exemple de terre renforcée en utilisant des branches d'arbres comme éléments résistant à la traction (Rao,1996).

Dans l'histoire moderne de la stabilisation des sols, le concept et le principe du renforcement des sols a été développée par Vidal (Vidal,1969). Il a démontré que l'introduction d'éléments de renforcement dans le sol augmente sa résistance au cisaillement. Par conséquent, les efforts pour utiliser des matériaux fibreux ont été lancés. Depuis l'invention par Vidal en 1969, près de 4000 structures ont été construites dans plus de 37 pays à ce jour en utilisant le concept de renforcement du matériau terre (Azeem,1992).

## **1.6 Conclusion:**

Ce chapitre a mis l'accent sur l'utilisation de la fibre de verre et le caoutchouc dans divers domaines de la construction. Fibre d'acier le plus largement utilisé et est considéré comme très répandu mais pas économique pas en bonne santé, nous avons donc dû utiliser des fibres de caoutchouc et de verre en raison de la disponibilité de façon spectaculaire dans la nature.

**CHAPITRE 2 :**  
**CARACTERISATION DES MATERIAUX**  
**UTILISE**

## 2.1.Introduction

Les bloc de terre et les produits céramiques, dont les matières premières sont des argiles, avec ou sans additifs. La forme des bloc est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des bâtiments et des travaux publics. Par rapport aux autres matériaux, c'est un des plus anciens matériaux de construction. Le bloc en terre est un mélange composé de sable de dune, d'argile et d'eau de gâchage, sans doute, liée aux caractéristiques de ses constituants.

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition des BTC, en suite nous allons donner le principe des méthodes utilisées dans la détermination des caractéristiques étudiées.

## 2.2.Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont :le sol, le sable de dune, la chaux, le ciment, les fibres de pneu et verre.

### 2.2.1. Sol

#### 2.2.1 .1.Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Djelfa , il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région(osséine de brique) .

#### 2.2.1 .2.Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. Houben (Houben, 1994) a indiqué que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10mm ; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression.



**Fig.2.1** :tamisage de sol

**a. Les masses volumiques**

Tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )
2197	1916

**b-Composition granulaire**

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais :les analyses granulométriques et sédiment normes NF P 18-560etNF P 94-057ont montré que les échantillons de carrière sont des sols argileux

La courbe granulométrique sort du fuseau recommander ourla fabrication de BTC. La figure suivante

Montre le graphe de la courbe granulométrique non corrigée de l'échantillon étudié. Ainsi Une stabilisation au sable était faite afin de corriger l'allure de la courbe granulométrie du Matériaux étudié (voir figure 2.2).

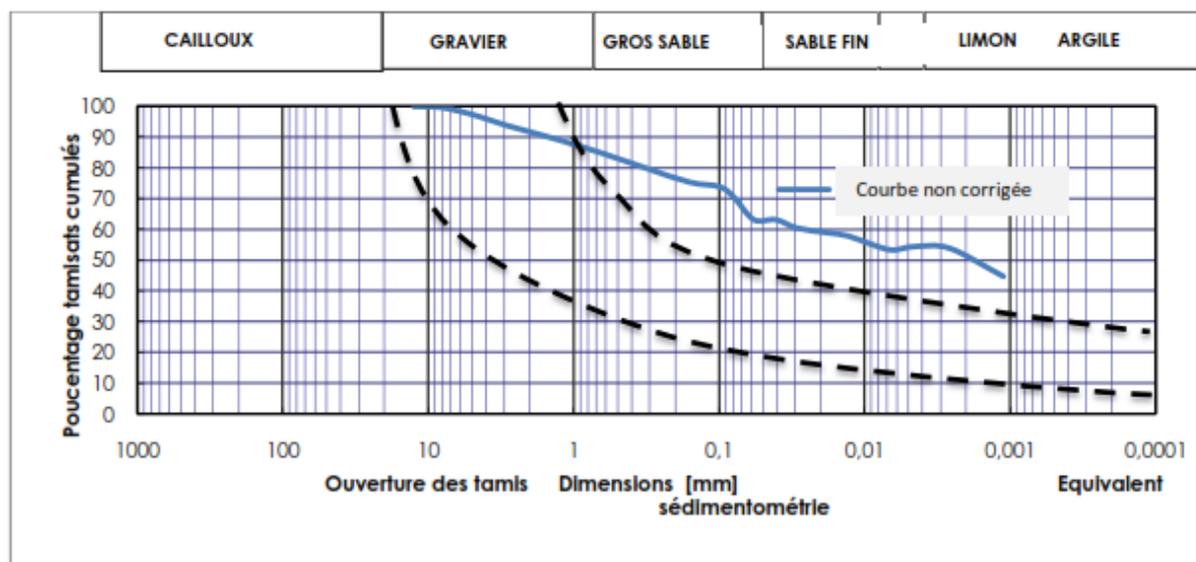


Fig.2.2: courbe granulométrique non corrigée

**C- Limites d’Atterberg:**

Les limites d’Atterberg permettent d’analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d’Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d’un sol (Doat, 1979). Les essais définis par Casagrande

s'effectuent sur le mortier de sol ( $d < 0,4 \text{ mm}$ ) selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés sur le tableaux 2.2

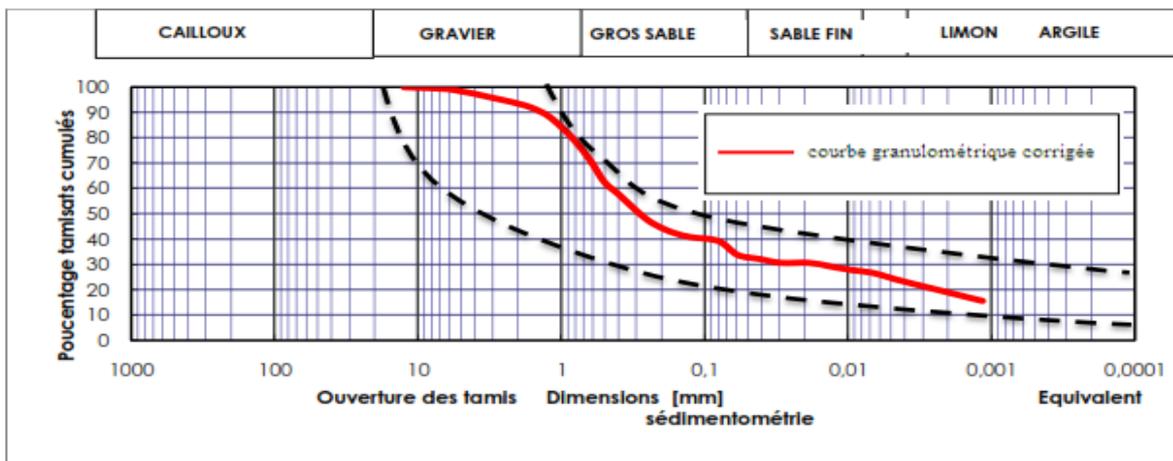
Les résultats obtenus pour notre sol, montrent que les limites de plasticité sont presque dans les limites les mieux adaptés pour les blocs de terre comprimée (la norme XP P 13-901) (figure 2.2). La norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ( $\% 2\mu\text{m} > 5 \%$ ).

**Tableau 2.2 .Caractéristiques géotechniques du matériau**

Matériaux	Granulométrie					Limites d'Atterberg			Compactibilité		Densité
	$\% < 2,5 \text{ mm}$	$\% < 2 \text{ mm}$	$\% < 0,08 \text{ Mm}$	$\% < 0,015 \text{ mm}$	$\% < 0,02 \text{ mm}$	Wl %	Wp %	Ip %	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	Wop m %	KN/ m <sup>3</sup>
Carrière de Loumbila	95%	93%	38%	30%	19%	33	18,6	14,4	1,83	14,9	27,4

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés sous forme d'une courbe appelée Courbe granulométrique qui donne le pourcentage cumulé d'éléments de dimension inférieure à chaque diamètre. Les plus gros grains sont de l'ordre de 2,5 mm de diamètre. Le matériau convient à la fabrication des blocs de terre comprimée après ajout du sable. Les critères Complémentaires  $f \times IP$  sont vérifiés.

La figure suivante représente la courbe granulométrique de l'échantillon corrigé :



**Fig.2.3 : Intervalle de confiance de la courbe granulométrique**

Cette courbe granulométrique se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance appelé Fuseau et recommandé pour la fabrication des BTC. Ce qui nous permet de justifier le choix De ce matériau pour la production des BTC afin de poursuivre le reste des essais au laboratoire

**2.2.1 .3. Analyse chimique et minéralogique**

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en éléments nocifs tels que les sulfates. Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). On associe sa présence à des dégradations de construction en terre. Le fort gonflement lié à l'hydratation de l'anhydrite et la solubilité de différents composés sont alors mis en cause. Dans le cas des blocs de terre comprimée et stabilisée, les sulfates peuvent également attaquer le ciment durci à l'intérieur du matériau particulièrement lorsque celui-ci est mis en contact avec de l'eau. Dans ce cas, une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3 % de sulfates doit être faite (Doat, 1979).

L'analyse minéralogique, elle aussi, est indispensable pour différencier les sols argileux.

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire CETIMàBoumerdès (Algérie).M rabhi mohamed 2014

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur ce sol, a révélé la composition chimique qui figure sur le tableau 2.3 :

**Tableau 2.3.**L'analyse par diffraction de rayons X a permis de déterminer la composition minéralogique

Composition chimique (%)									
Constituents	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Perte au fe
%	43,38	14,66	2,55	4,02	11,36	11,55	1,51	1,12	10,03

**Tableau 2.4 .** La composition minéralogique du sol

Minéraux	Quartz	Gypse	Calcite	Muscovite	feldspath k	Kaolinite	Minéraux ferrugineux +fond RX
Teneurs (%)	19	29.5	26,33	-	1,22	16.5	1

A travers l'analyse chimique du sol, on voit bien que le sol contient un taux important de trioxyde de soufre (anhydride sulfurique)  $SO_3$  (11,55 %) dépassant 3%, qui est la limite justifiant une étude spécifique d'après Doat et al. (Doat, 1979).

L'analyse minéralogique a révélé la présence d'un taux élevé de gypse (29,5 %) ce qui explique le taux élevé de trioxyde de soufre contenu dans le sol. Le sol contient aussi des taux considérables en quartz et en calcite, alors que la teneur en Kaolinite est peu importante.

### 2.2.2. Sable de dune

Le sable des dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Pour notre étude nous avons utilisé le sable des dunes Djelfa (zaafran)

#### 2.2.2.1- Analyse chimique

Pour compléter les analyses chimiques du sable de dune, des analyses chimiques ont été effectuées par le LNHC de Djelfa (Laboratoire National d'Habitat et de Construction), et qui ont donné les résultats illustrés dans le tableau 2.5. La constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 95 %, et par conséquent, le sable de dune de Djelfa est un sable siliceux.

**Tableau 2.5.** Analyse chimique du sable de dune

Symboles	Unité	Sable de dune
Résidu insoluble $SiO_2$ +Silice	%	95,87
Sulfates $SO_3$	%	0,91
Chlorures	Cl	% 0,36
Carbonate de Calcium $CaCO_3$	%	2,5
Matières organiques MO	-----	

#### 2.2.2.2 - Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques du sable de dune sont réalisées selon l'essai normalisé (NF P 18-560), par voie sèche, elles nous permettent de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs. Cette répartition est traduite par une courbe granulométrique présentée dans la figure 2.3

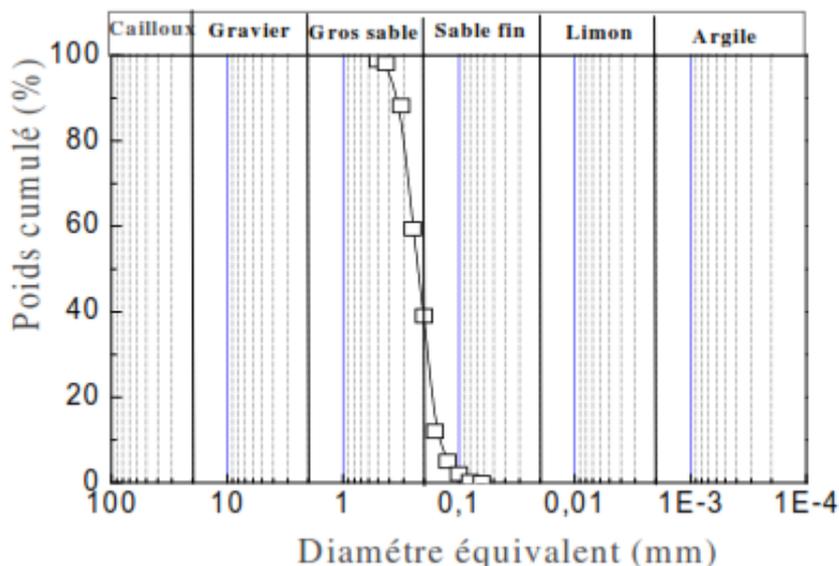
Les résultats des analyses granulométriques sont illustrés dans le tableau 2.6

**Tableau 2.6.** Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

$\Phi \leq 80\mu\text{m}$	$\Phi \leq 2\mu\text{m}$	Cu	Cc
2%	0%	1,7	1,1

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

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



**Fig.2.4 :** Courbe granulométrique du sable de dune

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (laboratoire central des Ponts et chaussées) basée sur le coefficient d'uniformité et de courbure, le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisés par les lettres SM (sable mal gradué), Sa courbe est uniforme et très peu étalée.

### 2.2.2.3-Equivalent de sable

Cet essai effectué selon la norme (NF P 18-598) est utilisé pour évaluer la propreté des Sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau 2.7

Le sable de dune de Djelfa est un sable propre.

**Tableau 2.7.** *Equivalent de sable du sable de dune*

	Equivalent de sable	
Paramètres	ES <sub>v</sub>	ES <sub>p</sub>
Sable	89,72	78,11

ES<sub>v</sub> : (équivalent de sable visuel).

ES<sub>p</sub> : (équivalent de sable au piston).



**Fig. 2.5 :** *Essai équivalent de sable*

### 2.2.3 -Ciment

Le ciment utilisé est un ciment **CPJ-CEMII/B 42.5N NA442-MATINE** disponible sur le marché fabriqué par la cimenterie Lafarge de hammam dalâa (wilaya de M'Sil

#### 2.2.3 .1 Les caractéristiques de ciment

Les caractéristiques de ciment sont présentées dans le Tableau 2.8

**Tableau 2.8.** Les caractéristiques de ciment

<b>Désignation</b>	<b>CPJ-CEMII/B 42.5 N NA442-MATINE</b>		
<b>Provenance</b>	Cimenterie Lafarge de Hammamdalaa(wilaya deM'Sila)		
<b>Propriétés physiques</b>	Consistance normale de la Pâteciment	25-28,5	
	Finesse Blaine	4150-5250µm/m	
	Début de prise	140-195min	
	Fin de prise	195-290 min	
	Retrait à 28 joursd'âge	< 1000 µm/m	
	Expansion	0,3-2,5 mm	
	Résistance à la compression à 28 jours d'âge	≥ 42,5 MPa	
	<b>Composition chimique</b>	Pertes au feu	7,5-12%
		Résidus solubles	0,7-2%
		Sulfates	2-2,7%
Oxydes de magnésium		1-2,2%	
Chlorites		0,01-0,05%	
Silicates tricalciques		55-62%	
Alcalis		0,5-0,75%	

### **2-2-4 La chaux**

La chaux est un matériau écologique utilisé aussi bien pour la maçonnerie que pour la décoration. Remplacé depuis le XXème siècle par le ciment, la chaux suscite un regain d'intérêt en raison de ses qualités intrinsèques qui en font l'élément incontournable d'un habitat sain. Dans cette étude on a utilisé la chaux produite par l'unité de chaux de Ghardaïa(Algérie). La composition chimique de la chaux, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le Tableau 2.9

Tableau 2.9. composition chimique de la chaux

Désignation	NHL	
Provenance	Usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saida, Algérie)	
Propriétés physiques	Densité volumique	600-900g/l
	Coefficient d'absorption	< 5
	Sensibilité au gel	<30
	Volume d'extinction	2,73 cm <sup>3</sup>
	Refus à 90 µm	< 10
	Composition chimique	Humidité
	CaO	> 83,3%
	MgO	<0,5%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1,5%
	SiO <sub>2</sub>	< 2,5%
	SO <sub>3</sub>	< 2,5%
	Na <sub>2</sub> O	< 4,7-0,5%
	CO <sub>2</sub>	< 5%
	CaCO <sub>3</sub>	<10%
	Insolubles dans HCl	< 1%

### 2.2.5. L'eau gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Djelfa.

### 2.2.6. Fibres

#### 2.2.6.1. Fibres caoutchouc:

##### Définition

Le caoutchouc est un matériau qui peut être obtenu soit par la transformation du latex sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), soit de façon synthétique à partir de monomères issus de combustibles fossiles. Il fait partie de la famille des élastomères. Le caoutchouc naturel (sigle NR, *Natural rubber*) est un polyisoprénoïde. Le schéma réactionnel correspondant à la formation du NR, qui utilise la photosynthèse, est très complexe sur la figure 2.6



**Fig.2.6.** Les fibres découpées en morceaux

### 2.2.5.2- La fibre de verre

La fibre de verre montrée sur la figure 2.7 est de type Cem Fil (alcali-résistante) fabriquée par Vetrotex Saint Gobin (France). Elle est livrée en fils coupés à des longueurs de 3, 6 et 12 mm. Chaque fil est composé de 204 filaments ayant chacun un diamètre de 10 $\mu$ m

La fibre de verre utilisée se caractérise par son enrichissement en zirconium qui lui confère une meilleure durabilité vis à vis de l'attaque alcaline du ciment. La composition chimique et les caractéristiques physico-mécaniques de la fibre de verre, données par le fabricant sont respectivement reportées sur les tableaux 2.10 et 2.11.

**Tableau 2.10.** Composition chimique du verre A.R

Corposants	Verre A.R
SiO <sub>2</sub>	66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Alcalins (Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O)	12
CaO	-
MgO	2
ZrO <sub>2</sub>	16,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5
TiO	-

**Tableau 2.11.** *Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre A.R*

Propriétés	Fibre A.R
Masse volumique (densité) $\rho$	2,68 g/cm <sup>3</sup>
Contrainte à rupture en traction : Filament vierge	3000 Mpa
Module d'élasticité en traction	73 000 Mpa
Allongement à rupture	4,3 %
Coefficient de dilatation linéique $\alpha$ (entre 20 et 100°C)	5.10 <sup>-6</sup> m/m/°C
Comportement au feu	Incombustible
Softening point (point de ramollissement)	773°C

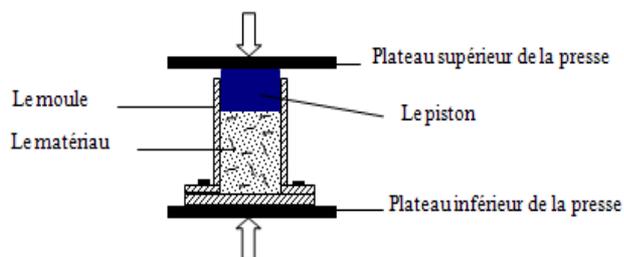
**Fig.2.7 :** *Fibre de verre utilisée de type Cemfil (A.R)*

## 2.3. Confection des blocs

### 2.3.1. Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule selon le modèle de Guettala et al. (Guettala, 2006). Il est en acier trempé, et il est composé de 5 éléments formant après montage un volume de 10x10x20 cm<sup>3</sup>. Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange.

Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la figure 2.8.



**Fig. 2.8.**Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC



**Fig.2.9.***moule utilisé pour la fabrication des BTC*

### 2.3.2 -Mélanges

D'après des études menées par Mesbah et al.(Mesbah, 1999) et P'KLA (P'KLA, 2002), le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux, et que la détermination de la teneur en eau optimale pour le BTC à partir de l'essai Proctor est inappropriée, car l'énergie de compactage n'est pas la même que celle d'un compactage statique utilisé pour la fabrication du BTC. Ceci nous a poussé à utiliser la presse directement, en appliquant le compactage statique selon la méthode proposée par le Centre pour le développement de l'entreprise (CDE) (CDE,2000).

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé aussi sur l'étude réalisée par Guettala et al. (Guettala, 1997), qui a montré que la concentration du sable dans les BTC a peu d'influence sur la résistance mécanique, mais des dosages entre 25 % et 40 % ont données les meilleurs résultats. Par suite, on a introduit 30 % de sable concassé dans tous les mélanges utilisés dans cette étude.

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 2 Kg.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la figure 2.10 et le tableau 2.12.

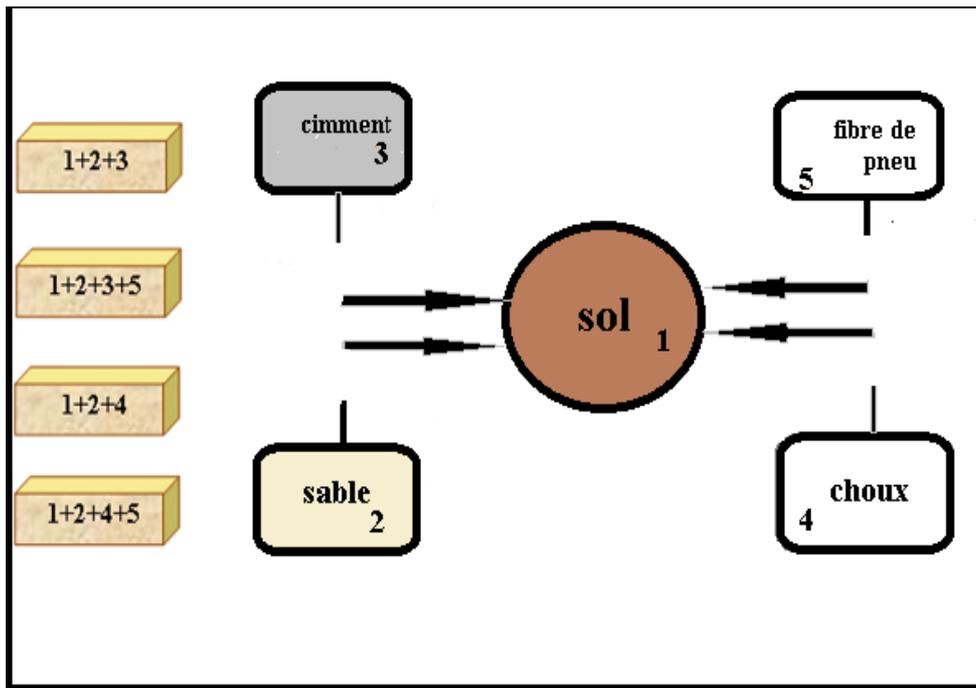


Fig. 2.10: Combinaison des mélanges des bloc

Tableau 2.12. Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Numéro du mélange	Sol (%)	Sable concassé (%)	Fibres (%)			Ciment ou chaux (%)	
			Fibres de palmier dattier ou Fibre de verre			Ciment	chaux
par rapport au mélange sec(sol-sable)							
1	70	30	0			10	12
2			0.05				
3			0.1				
4			0.15				
5			0.20				
6			0.25				
7			0.30				



Fig2.11.Le poids du mélange global sec pour chaque bloc



Fig2.12. :mélange global sec( 2Kg)

### 2.3.3-Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules, à titre d'exemple, BCSF désigne un bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres.

La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 2.13.

Tableau 2.13.Codification des mélanges.

Code	Désignation
<b>BTCSF</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de ciment sans fibres</b>
<b>BTCV</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de verre</b>
<b>BTCC</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de ciment avec fibres de caoutchouc</b>
<b>BTCHSF</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres</b>
<b>BTCHV</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de verre</b>
<b>BTCHC</b>	<b>Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de caoutchouc</b>

### 2.3.4-Préparation des mélanges

les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. les matériaux (sol + sable + liant) sont d'abord mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur avec une vitesse de 140 tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant deux minutes pour le mélange. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes. Finalement on procède à l'ajout des fibres en faisant le malaxage manuellement. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage



**Fig2.13:** *malaxeur*



**Fig2.14 :** *mélange après malaxage avec les fibres de verre*

### 2.3.5-Optimisation de la teneur en eau

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, surtout lorsqu'ils sont fins, une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % (Guettala, 1997). Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition.

Les blocs sont fabriqués à l'aide d'une presse hydraulique à force imposée selon la procédure du Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000).

Voici les étapes de la procédure :

- prendre une quantité de matériau humide avec un taux de liant donné (ciment ou chaux) à une teneur en eau de environ  $W = 6$  à  $9$  % ;
- fabriquer trois blocs à l'aide de la presse ;
- mesurer la masse à l'état humide ( $m_h$  en g) et les dimensions de chaque bloc (longueur  $L$ , largeur  $l$  et épaisseur  $h$  en cm);
- calculer la masse volumique sèche de chaque bloc :
- $MVS = 100 \times m_h / (L \times l \times h \times (100 + W))$  ;
- préparer des quantités de matériaux de teneurs en eau d'environ 1 à 2 % de plus que la précédente et répéter les opérations, jusqu'à obtenir des blocs trop humide (visuellement) au démoulage ;
- tracer le diagramme des masses volumiques sèches en fonction de la teneur en eau ;
- en observant le diagramme, on détermine la teneur en eau optimale (TEO) correspondant à la masse volumique sèche maximale (MVS<sub>max</sub>).

La figure 2.14 montre l'optimisation obtenue pour les mélanges (10 % de ciment) ou (12% de chaux ) pris comme références (voir tableau 2.14). Pour le reste des mélanges, on a procédé à un réajustement de la teneur en eau selon le cas étudié.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.14..

**Tableau 2.14.** *Optimisation de la teneur en eau.*

<b>Mélange</b>	<b>Liant (%)</b>	<b>Mvsmax (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>TEO</b>
<b>1</b>	<b>Ciment (10)</b>	<b>2,04</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Chaux(12)</b>	<b>1,93</b>	<b>15</b>

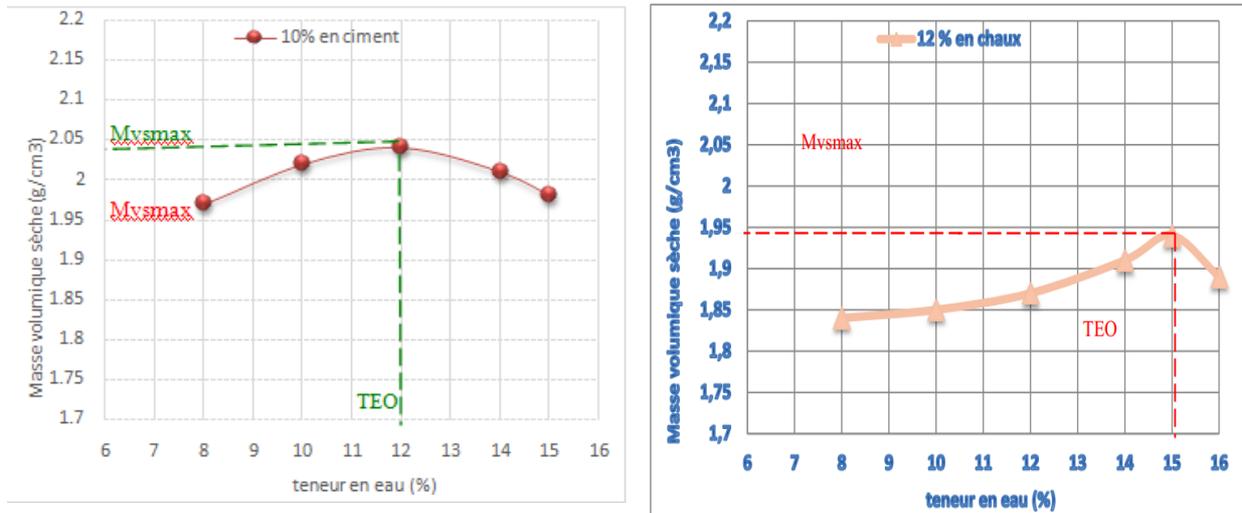


Fig. 2. 15: Optimisation de la teneur en eau

### 2.3.6-Compactage des mélanges:

Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble - moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué contrainte de compactage (5 MPa), tout en respectant le programme présenté dans le tableau 2.15

Tableau 2.15. La contrainte de compactage des mélanges

Le mélange	La chaux (%)	Ciment (%)
sol+sable du dune+(ciment ou chaux ) sans fibres	12	10
sol+sable du dune +(ciment ou chaux ) + fibres de verre	12	10
sol+sable du dune +(ciment ou chaux ) + fibres de caoutchouc	12	10

démoulage se fait immédiatement après le compactage.



**Fig. 2. 16.** *appliqué contrainte de compactage (5 MPa)*

## **2.4.La cure des blocs**

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure de 28 jours est indispensable.

Pendant cette période, on maintiendra le matériau en atmosphère humide, à l'abri du soleil, en prenant garde au vent; ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions de conservation réelles, les blocs doivent être protégés avec du plastique durant les premiers jours avant leur utilisation.

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à assurer son étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, le bloc est conservé au laboratoire à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 24 heures avant d'être soumis aux différents modes de cure.

Pour étudier l'influence du mode de cure, les BTC sont curés selon mode :

- au laboratoire

### **2.4.1.Conservation au laboratoire**

Tous les blocs étudiés, sauf ceux qui sont cités dans les deux autres modes, sont conservés au laboratoire à une température  $T= 20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 28 jours (figure 2.17). Les blocs concernés par ce mode sont : BTCSF, BTCV, BTCC. BTCHSF. BTCHV. BTCHC



**Fig. 2. 17.** *Conservation des blocs au laboratoire*

### **2.5 Propriétés mécaniques:**

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression des BTC à l'état sec et à l'état humide par le biais de l'essai de compression simple, et la résistance à la traction sèche en réalisant l'essai de traction par fendage. Pour chaque essai, deux blocs ont été testés.

#### **2.5 1 -Essais de compression simple:**

- **But:**

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des briques. Les briques sont écrasées à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la construction.

- **Principe:**

Il s'agit de soumettre un échantillon de bloc à une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de déterminer la résistance nominale en compression sèche et humide des blocs de Terre compresses.

- **Mode opératoire :**

Poser l'échantillon de BTC entre les plateaux de la presse. Appliquer la charge d'une manière continue et ce, avec une vitesse de 0,05mm/s régulière jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Relever la charge maximale supportée par l'échantillon au cours de l'essai.

**NB** : la compression humide est faite après deux heures d'imbibition des échantillons dans l'eau.

- **Expression des resultants:**

La résistance à la compression des blocs est donnée par la formule:

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

avec:

- ✓ **R<sub>c</sub>**: résistance à la compression en MPa
- ✓ **F** : charge maximale supportée par les deux briques en kilo newtons (KN)
- ✓ **S** : surface moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm<sup>2</sup>)

a résistance en compression des blocs est la moyenne arithmétique des résistances d'au moins deux essais réalisés sur des échantillons d'un même lot. L'équipement d'essai est illustré à la figure 2.18



**Fig. 2. 18.**Essai de compression

### 2.5.2- Essai de traction

- **But:**

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

- **Principe de l'essai:**

Le BTC test est posé (sur une de ces grandes faces) sur deux appuis espacés d'une distance  $l_0$  et perpendiculairement à la longueur du bloc. Dans l'axe au-dessus du bloc, parallèle au petit côté, on pose un autre appui surmonté d'un plateau sur lequel sera exercée une force croissante jusqu'à la rupture du bloc testé. On obtient une valeur de rupture en flexion. Multiplié par cinq, cette valeur indique la résistance en compression minimale. L'équipement d'essai (le portique universel) est illustré à la figure 2.18.

• **Expression des resultants:**

La résistance à la traction des blocs est donnée par la formule:

$$(2.2) \quad \delta f = \frac{M_{\max}}{I} \cdot y_{\max}$$

$$M_{\max} = (f/2) \cdot 5\text{cm}; \quad I = bh^3/12 \quad , \quad y_{\max} = h/2$$

avec :

- ✓ **F** : charge à la rupture de la brique en flexion en KN
- ✓ **L<sub>0</sub>** = 20 cm
- ✓ **B** = 10 cm
- ✓ **H** = 5 cm

$$\text{A.N: } \delta f = \frac{f}{16,66} \text{ (N)}$$



**Fig. 2. 19.** *Essai de traction*

## **2.6- Conclusion:**

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée fibrés développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable de dune, le ciment, et chaux ,et les fibres. Les fibres utilisées dans cette étude sont (fibres de verre) et (fibres de caoutchouc) .

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude.

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

# CHAPITRE 3

## PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

## CHAPITRE 3 PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux, qui a comme but, l'étude de l'effet de taux et de type des fibres (Verre, caoutchouc) sur:

- ✓ la masse volumique apparente du BTS ;
- ✓ le comportement mécanique du BTS ;

Il faut signaler que l'étude de l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques du BTS à base de chaux et le ciment a été réalisée, en vue de faire un bon choix du mode et temps de cure pour le reste de l'étude. Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre et le sable de dune, une teneur en chaux vive (12 %) et le ciment (10%), un type de fibres (les fibres de caoutchouc et les fibres de verre), six teneurs en fibres (0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25 et 0.30 %) du poids du mélange sec (2Kg) .

### 3.2. Résistance à la compression R C28 de BTS

La résistance à la compression exprimée par la capacité de BTS, a éisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Les résultats de l'essai de compression sont représentés dans la figure 3.1 et dans le tableau 3.1 par leurs moyennes.

**Tableau 3.1.** Résistance à la compression à 28 jours en fonction du teneur des fibres.

Résistance à la compression de béton de terre stabilise (MPa)				
Taux de fibres	Fibres de caoutchouc		Fibres de verres	
	Chaux	Ciment	Chaux	Ciment
0	2,15	7,4	1,08	7,21
0,05	3,02	8,98	2,85	8,78
0,1	3,24	9,6	3,05	9,04
0,15	3,29	9,92	3,08	9,41
0,2	3,36	10,55	3,13	10,26
0,25	3,41	9,91	3,01	9,24
0,3	2,8	8,96	2,9	8,58

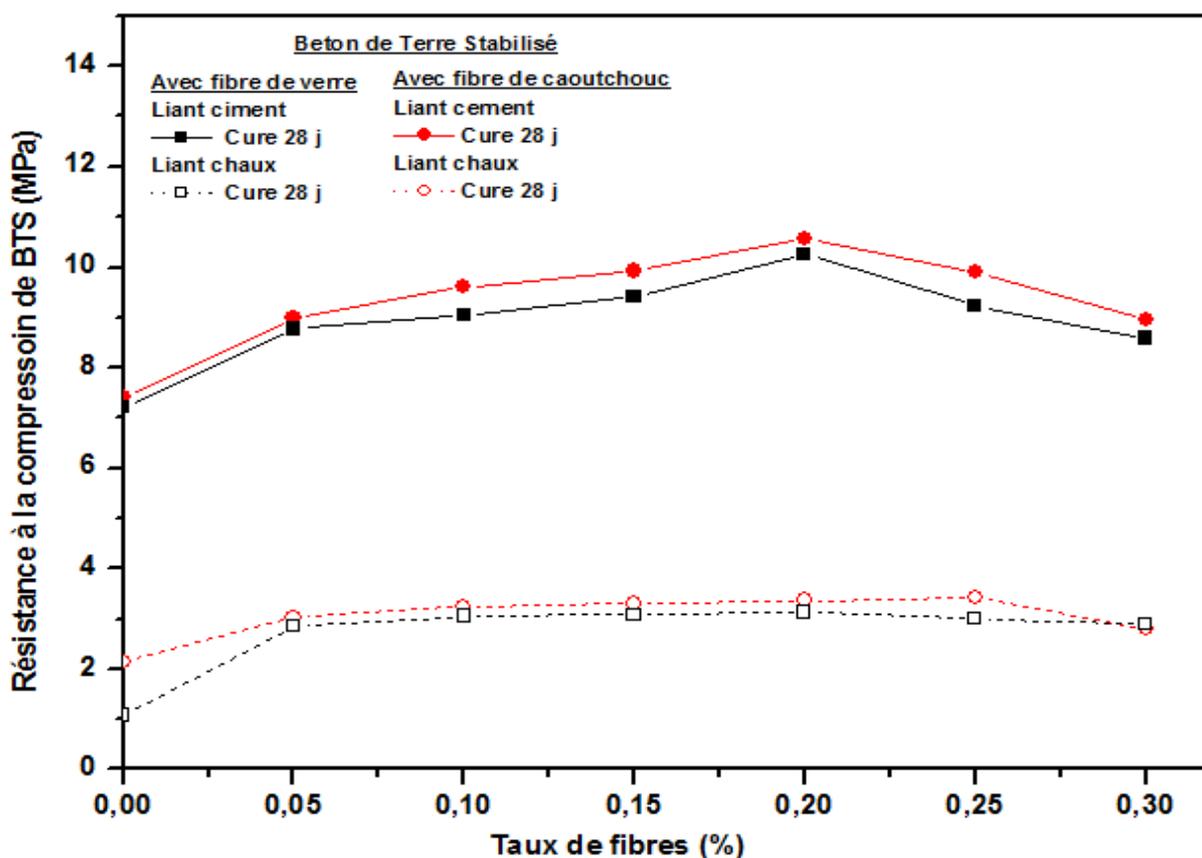


Fig. 3.1. L'effet de teneur des fibres (caoutchouc – verre) sur la résistance à la compression de BTS .

### 3.2.1 L'effet de la variation de la teneur des fibres (caoutchouc - verre) sur la résistance à la compression à 28j de BTS

Les résultats représentés sur la figure 3.1 montrent que la résistance à la compression à 28 jours à différents liants hydrauliques (chaux et ciment) est augmenté en fonction de l'augmentation de la teneur des fibres de verre et caoutchouc jusqu'à 0.2 % et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 0.30 % . La Croissance est d'autant importante en allant du teneur des fibres de caoutchouc de 0 à 0.20% et la décroissance est d'autant importante en allant du teneur de 0.2 à 0.3%. Pour les deux types de fibres pour les différents liants hydrauliques est une fonction croissante jusqu'à 0.20% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante . Les recherches ont montré que les blocs de terre stabilisée à la chaux conservés à une température ambiante de 20 à 30°C, exigent une durée de cure très importante dépassant un mois pour assurer un développement satisfaisant de la résistance (Venkatarama,2002).

La présence des fibres dans le mélange sous une importance de contrainte qui rendent le mélange trop élastique après chargement surtout les fibres caoutchouc. Ceci entraîne une augmentation du réseau dans les blocs de terre stabilise, ce qui se répercute favorablement sur la résistance. Ainsi que le temps du cure et l'ajout de liants hydrauliques jouent un rôle important pour augmenter la résistance à la compression. Les liant hydraulique ici diminuer les pores internes entre les particules dans mélanges et renforcer les liaisons inter-granulaires. Nous notons également que le ciment avec les fibres de caoutchouc est atteint du maximum résistance à la compression (10.55 MPa) pour 0.2 % fibres de caoutchouc .L'ajout des fibres et les liants hydrauliques a conduit d'améliorations les

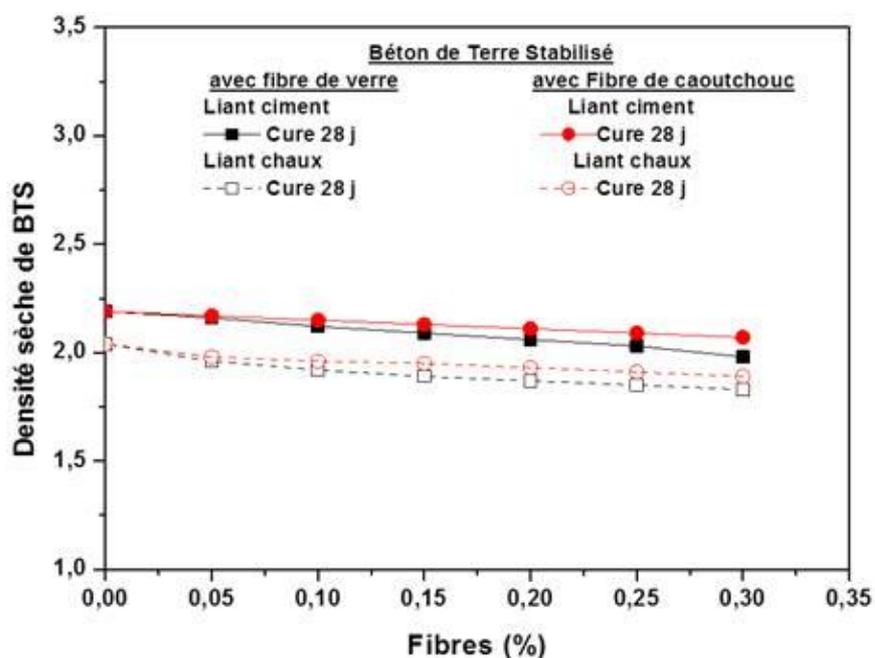
propriétés mécaniques du bloc de terre stabilisé.

### 3.3 Densité sèche de BTS

La densité est le rapport de la masse volumique du BTS par rapport à la masse volumique de l'eau. Elle joue un rôle très important dans les propriétés thermo-physique, ainsi sur la maniabilité de son utilisation dans les divers chantiers de construction. Les résultats sont représentés dans la figure 3.2 et dans le tableau 3.2 par leurs moyennes ci-dessous :

**Tableau 3.2.** Densité sèche de béton de terre stabilisé - BTS.

Taux de fibres	Fibres de caoutchouc		Fibres de verres	
	Chaux	Ciment	Chaux	Ciment
0	2,04	2,19	2,04	2,19
0.05	1,98	2,17	1,96	2,16
0.1	1,96	2,15	1,92	2,12
0.15	1,95	2,13	1,89	2,09
0.2	1,93	2,11	1,87	2,06
0.25	1,91	2,09	1,85	2,03
0.3	1,89	2,07	1,83	1,98



**Figure 3.2.** L'influence du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre sur la densité sèche de BTS à différents liant hydraulique.

### 3.3.1 L'effet de la variation de la teneur des fibres sur la densité sèche de BTS

D'après Les résultats représentés sur la figure 3.2, on constate que la densité sèche de BTS pour les deux types de fibres pour différents liant hydraulique est légèrement décroissance graduelle en fonction de la teneur en fibres de caoutchouc et de fibre de verre. La décroissance est d'autant importante en allant du teneur de 0 à 0.3% pour les fibres caoutchouc et le verre.

Par exemple l'augmentation des fibres de verre de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air à avec le ciment est engendré diminuer d'ordre de 1.85%, et l'augmentation des fibres de caoutchouc de 0.05 à 0.10% pour des BTS conservés à l'air à avec le ciment est engendré réduire d'ordre de 0.9 %.Ceci signifie que la densité de BTS à base des fibres de caoutchouc est plus grande que celle du BTS à base des fibres de verre.Le temps de la cure favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires. Ceci signifie que la durée de cure conduit à une diminution de la densité des plus gros capillaires due à l'hydratation croissante de la chaux et le ciment.

### 3.4 Résistance à la traction de BTS à 28 jours

La résistance à la traction exprimée par la capacité de BTS, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la traction. Les résultats de l'essai de traction sont représentés par leurs moyennes dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.2.** Résistance à la traction à 28 jours en fonction du teneur des fibres.

Résistance à la traction de béton de terre stabilisé (MPa)				
Taux de fibres	Fibres de caoutchouc		Fibres de verres	
	Chaux	Ciment	Chaux	Ciment
0	0.05	0.135	0.03	0.11
0.05	0.066	0.148	0.043	0.12
0.1	0.07	0.163	0.054	0.137
0.15	0.121	0.171	0.1	0.142
0.2	0.139	0.233	0.12	0.187
0.25	0.109	0.203	0.097	0.172
0.3	0.1	0.191	0.091	0.16

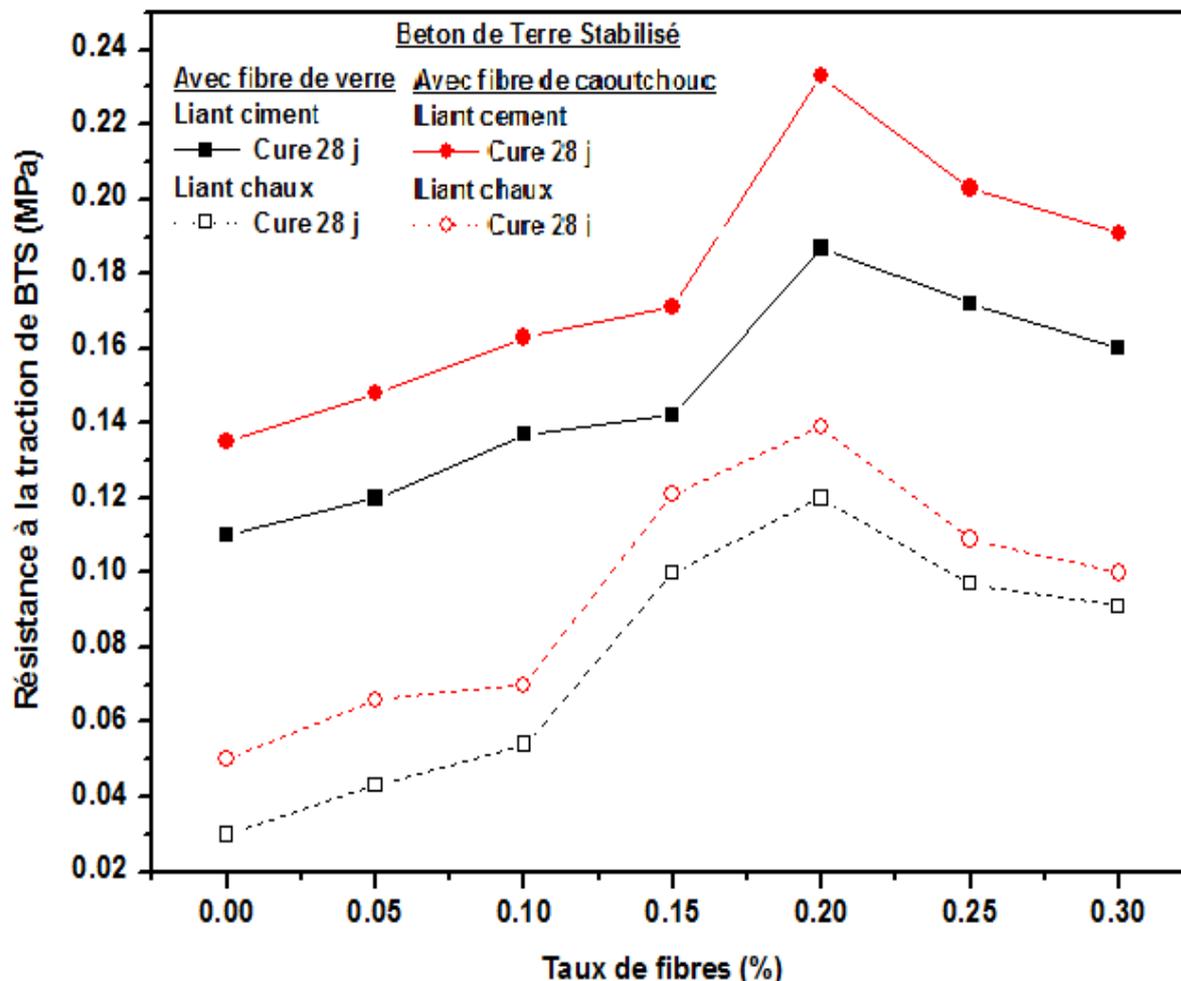


Figure 3.3. Effet du teneur des fibres de caoutchouc et des fibres de verre, type de liant (chaux et ciment) sur la résistance à la traction de BTS.

### 3.4.1 L'effet de la variation de la teneur de fibre de caoutchouc et de fibre de verre et type de liant sur la résistance à la traction de BTS

Les résultats représentés sur la figure 3.3 montrent que la résistance à la traction à 28 jours pour les deux types de fibres est une fonction croissante jusqu'à 0.20% de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante pour les deux fibres (0.2-0.3%).

A titre d'exemple l'augmentation des fibres de caoutchouc de 0.15 à 0.20% pour des BTS conservés à l'air se passer une augmentation d'ordre de 12.95%. Par contre l'augmentation des fibres de 0.20 à 0.25% pour des BTS conservés à l'air se passer une diminution d'ordre de 21.58%.

De plus, on remarque que la résistance à la traction à 28 jours du BTS avec fibres de caoutchouc plus grande que le BTS avec fibres de verre. Par exemple l'augmentation de la résistance à la traction pour un BTS de cure 28j, fibre de caoutchouc 0.20% est de l'ordre 24.60%  $(0,233-0,187)/0,187$  par rapport au BTS de cure 28j, fibre de verre 0.20% avec l'ajout de 10% ciment.

### 3.5 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la possibilité d'améliorer les propriétés physico-mécaniques, et inclure différents types d'intérêt de fibres (naturelles et synthétiques), mais la vue grandiose de la fibre, de (caoutchouc et verre) spécifiquement. Pour tirer le meilleur parti de la stabilité BTS, et l'utilisation du programme d'installation chimique (chaux et ciment). Pour la stabilité, car il se caractérise par une pouzzollanique de réaction lente, une étude de temps et de mode de cure a été élaborée, en vue de réduire le temps de conservation des BTS à base de chaux et ciment en attendant qu'ils atteignent une résistance acceptable pour la construction des murs en terre.

## Conclusion générale

Ce progrès scientifique étourdissant dans le monde de la construction qui a travaillé sur la production de bâtiments modernes avec les dernières innovations de la technologie de construction moderne des bâtiments précédents sciences équipée en utilisant les fibres de (caoutchouc et verre) qui allie la beauté de la forme architecturale et son poids léger et la vitesse de construction en plus de la bonne isolation thermique avec la durabilité et la durée de vie des bâtiments conventionnels aurait aimé la profondeur plus sur ce sujet, mais il était impossible de l'obtenir dans les références, mais cela ne nous a pas empêché de vous tenir informé de ce nouveau type de béton composé de chaux, ciment, d'argile, et de sable à vous de poursuivre les recherches que vous avez la curiosité.

Grâce aux résultats de cette étude pilote, nous avons identifié les principales conclusions suivantes :

- ✓ Une réduction de la masse volumique apparente du BTS avec l'augmentation de la teneur en fibres a été observée. Mais malgré cette observation, on doit mentionner que cette réduction est très faible comparativement à celle du BTS sans fibres.
- ✓ L'ajout de fibres de palmier a augmenté de 0,05% à 0,20% une légère amélioration à sec enregistré à la résistance à la compression, stabilisée avec 12% de chaux et 10% de ciment. Mais pour le reste des cas étudiés de 0,20% à 0,3%, a donné lieu à l'ajout de fibres d'abaisser la résistance à la compression.
- ✓ En comparant la résistance à la compression de BTS, on constate une augmentation générale de la résistance à la compression à base des fibres de caoutchouc par rapport au BTS à base des fibre de verre. Mais la résistance à la traction de BTS, on observer une légèrement augmentation générale de la résistance à la traction à base des fibres de caoutchouc par rapport au BTS à base des fibre de verre.
- ✓ L'incorporation des fibres de caoutchouc d'une part a un grande effet positif sur le comportement post-contrainte de rupture du BTS, en augmentant sa ductilité par rapport au comportement fragile de la matrice seule; et d'autre part L'incorporation des fibres de verre effet Moins.

## **Bibliographique**

- [1] MEUKAM P., « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments » Thèse doctorat, université Yaoundé, Décembre 2004
- [2] Fiche technique Qualiremo ,« La terre crue » , « [www. tkTerreCrue.html](http://www.tkTerreCrue.html). » ,Avril 2008
- [3] RICHARD P., « Adobe » ,mémoire Maître en environnement ,Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
- [4] MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie compiègme , 2010
- [5] CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I »Manuel de production .
- [6] DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister ,Université de Ouargla, 2007.
- [7] CORPUS « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, 2006.
- [8] RHONE A ., « Le pisé » [www .ageden.org](http://www.ageden.org) , Edition Décembre2010.
- [9] CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies.
- [10] LIVERT S., «Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février2011.
- [11] L. ALVISET, Matériaux de Terre Cuite "Techniques de l'Ingénieur" 1994.
- [12] A. KOMAR, Matériaux et Elément de Construction, Edition MIR 1978.
- [13] E. Oliver, Les Maçonneries, Edition ISBN 1974
- [14] M. DURIEZ, JARRAMBIDE, Nouveau Traite De Matériaux De Construction Edition DUNOD 1962.
- [15] E OLIVER, Technologie des Matériaux de Construction, Edition ISBN 1976
- [16] R. Delebecque, Éléments de Construction "Bâtiment", Edition Delagrave 1990.

[17] Collection Mémento Technique, Tuiles et Briques de Terre Cuite, Edition Moniteur paris 1998.

[18] Recueil de Norme Française "Bâtiment Maçonneries " Edition AFNOR,1984.

[19] MVENUAT ,Produits Silico –calcaire "Techniques de l'Ingénieur"1994.

[20] RéunionD'ingénieurs,Matériaux de Construction, Edition Eyrolles 1979.

[21]CNERIB, Règles de Conception Et de Calcul des Maçonnerie DTR (C2-45) , Edition CNERIB 1997.

[22] H.RENAUD, Murs Poutres Planchers, Edition Eyrolles 2002.

[23] CRA Terre Centre International pour la Construction en Terre, H. GUILAUD, Ecole d'Architecte de Grenoble, Encyclopédie de Bâtiment Tome 2 Edition Wake 1997.

[24]CRA Terre, P. DOAT, .et AL, Construire en Terre, Edition Alternative Paris, 1983.

[25]CRA Terre, H .HOUBEN et H .GUILLAUD, Traité de Construction en Terre, Edition Parenthèses, Marseille, 1989

. [26] VOLHARD, F, La Construction en Terre– Paille, Ancien Matériau Nouvelle Technique, Edition CRA Terre, Grenoble, 1991

[27] CRA Terre, H. HOUBEN et VERNEY, ENTPE, OLVIRER, M. MESBAH, Références bibliographiques 87 A .et MICHEL, PH, Construction en Terre Crue : les matériels français, Edition CRA Terre, Grenoble, 1987

. [28] CRA Terre, H .HOUBEN, H et VERNEY, P.E. Bloc de Terre Comprimée : Choix De matériel de production, Editions du CDI, Bruxelles, 1988.

[29] CNERIB,Béton de Terre Stabilise, Edition CNERIB 1988.

[30] G .BAUD, La Construction de Bâtiment "Maçonnerie Et Béton Arme "  
Edition Spes 1981. [21] (ATHIL),Guide Pratique pour l'Emploi des Ciments,  
Edition Eyrolles 1998.

[32]G. DEUX, J. FESTA, Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants  
Edition Eyrolles 1998.

[33] Cimbeton Fiches Techniques CIM Béton C2/1 ciment 1997

[34] SABLOCRETE, Béton de Sable, presses de l'école des ponts et de  
chaussées France 1994.

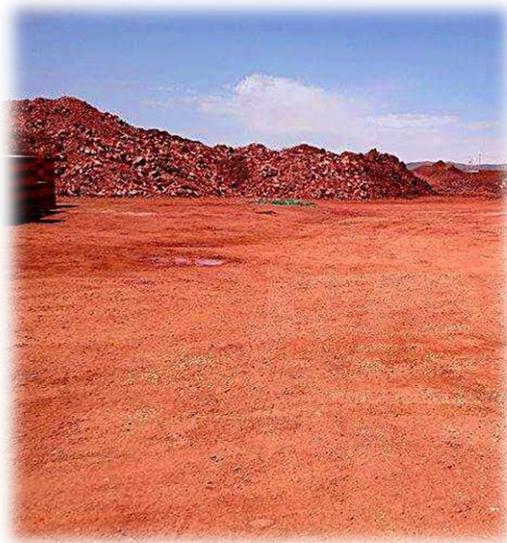
[35] R. DUPAIN, R. LANCHON, J. C. SAINT- ARROMMAN, Granulats, Sols,  
Ciments et Bétons, Edition Casteilla 1995.

[37] N. ARABI, Mémoire de Magister "Etude des Brique Silico-calcaire à Base  
de Laitier Granule, Université De Anaba 1988.

[38] M. L. LOUCEF ,Mémoire de Magister "Elaboration de Brique Réfractaire à  
Base de la Dolomie de Ain Mimoun (INMC) Boumerdes 1997.

[39] I .BENTATA .Mémoire de Magister, " Etude Expérimentale d'un Béton  
avec Le Sable de Dune", Université de Ouargla 2003

# **ANNEXES**



Mobilisation d'argile (usine de brique)



préparation des fibres de pneu



Le poids du mélange



malaxage



Graissage de moule



Compactage de mélange



Démoulage de produit



Finitions de produit



Emballage de bloc (état humide)



Conservation des blocs au laboratoire



Le poids des blocs



Enregistrement Résultats



Essai de traction par flexion



Essai de compression