

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Par

REBAI Ouissam

MEERROUCHE Chaima

BEN ABBAS Raouia

BENBOUGUERRA Amira

Intitulé

**BRIQUE DE TERRE COMPRIMÉE À BASE DE CENDRE
DE BOIS : UNE APPROCHE DURABLE**

Soutenu le : 04 / 07 / 2023

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
M. AMMAR NOUI	MCA	Président	Univ-BBA
M.BELKADI AHMED ABDERAOUF	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.RAOUACHE ELHADJ	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.BENAMMAR ABDEFHAFID	MCB	Examineur	
M.ADEL BOUNGABE	MCA	Examineur	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Je suis honoré de pouvoir dédier ce mémoire à des personnes qui ont été si importantes pour moi tout au long de mon parcours universitaire.

Ce mémoire est le fruit de plusieurs mois de travail acharné et de persévérance. Je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs sacrifices. Vous m'avez appris à toujours viser plus haut, à ne jamais abandonner et à croire en moi-même. Vous êtes les piliers de ma vie et je suis fier de vous avoir comme parents.

Je ne peux pas non plus oublier de remercier mes amis, qui ont été une source de joie et de soutien tout au long de mon parcours. Vous m'avez accompagné dans les moments difficiles,

Je vous remercie pour votre amitié sincère et votre soutien indéfectible.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon encadrant, M. Belkadi Ahmed Abderraouf, pour ses précieux conseils, sa patience et son dévouement envers ses étudiants.

Grâce à ses enseignements, j'ai acquis des compétences techniques et méthodologiques essentielles pour la réussite de ce travail.

Je n'oublie pas non plus notre Co-encadrant, M. Elhadj Raouache, qui a apporté une contribution précieuse à ce travail et qui a partagé son expertise avec moi.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre plus sincère gratitude pour votre soutien tout au long de la réalisation de notre mémoire. Votre contribution a été essentielle à la réussite de ce projet.

Tout d'abord, nous voudrions remercier notre Dieu pour Sa bénédiction et Sa grâce infinie.

Nous sommes reconnaissants pour toutes les opportunités et les bénédictions qu'Il nous a offertes, ainsi que pour Sa guidance tout au long de ce processus.

Nous tenons également à exprimer ma gratitude envers nos parents pour leur amour, leur soutien et leur encouragement constants. Nous sommes reconnaissants pour tout ce qu'ils ont fait pour nous tout au long de notre parcours académique.

Nous tenons à remercier notre encadreur, M. Belkadi Ahmed Abderraouf et notre Co-encadreur M. Elhadj Raouache, pour leurs temps, leurs patiences et leurs expertises. Vos conseils avisés et votre soutien constant ont été d'une grande aide tout au long de ce projet.

Nous sommes reconnaissants pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers le jury pour avoir accepté et approuvé notre mémoire. Votre évaluation approfondie et objective de notre travail nous a aidés à améliorer nos compétences et notre compréhension du sujet.

En somme, je suis convaincu(e) que sans l'aide et le soutien de chacun de vous, nous n'aurions pas réussi à atteindre cet objectif. Nous vous sommes très reconnaissants pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de l'utilisation de briques de terre compressée (BTC) avec des poudres de bois et des cendres de bois stabilisées au ciment. L'objectif principal de cette recherche est d'explorer la possibilité d'améliorer les propriétés des briques de terre compressée en ajoutant ces matériaux locaux et durables.

Une revue des références précédentes a été réalisée afin de comprendre les recherches antérieures sur les briques de terre compressée, les poudres de bois et les cendres de bois, ainsi que leur rôle dans la construction. Ensuite, des expériences ont été menées en laboratoire pour évaluer les performances mécaniques des briques de terre compressée fabriquées avec différentes proportions de poudres de bois et de cendres de bois stabilisées au ciment.

Les résultats ont été analysés et discutés, en mettant l'accent sur l'impact de l'ajout de poudres de bois et de cendres de bois sur les propriétés des briques de terre compressée. Les résultats ont montré que l'ajout de ces matériaux a contribué à l'amélioration à améliorer la résistance mécanique des briques.

Enfin, des recommandations ont été formulées proposées pour tirer pleinement parti des briques de terre compressée avec des poudres de bois et des cendres de bois stabilisées au ciment dans la construction. L'accent a été mis sur les avantages environnementaux, économiques et sociaux.

Mots clés : Brique de terre comprimée, cendre de bois, copeaux du bois, ciment

ملخص

تتناول هذه الرسالة دراسة استخدام الطوبج الأرضي المضغوط مع مساحيق الخشب ورماد الخشب المستقر بالأسمنت. المدفوع الرئيسي لهذه البحث هو استكشاف إمكانية تحسين خصائص الطوبج الأرضي المضغوط عن طريق إضافة هذه المواد المحلية والمستدامة.

تم إجراء مراجعة للمراجع السابقة لفهم الجوانب السابقة حول الطوبج الأرضي المضغوط ومساحيق الخشب ورماد الخشب ودورها في البناء. ثم تمت المباشرة بإجراء تجارب في المختبر لتقييم الأداء الفني للطوبج الأرضي المضغوط المصنوع باستخدام نسبة مختلفة من مساحيق الخشب ورماد الخشب المستقر بالأسمنت.

تم تحليل النتائج ومناقشتها، وتم التركيز على تأثير إضافة مساحيق الخشب ورماد الخشب على خصائص الطوبج الأرضي المضغوط. أظهرت النتائج أن إضافة هذه المواد قد ساهمت في تحسين المقاومة الميكانيكية للطوبج وتقليل قدرتها الحرارية. بالإضافة إلى ذلك، ساهم وجود رماد الخشب المستقر بالأسمنت في تعزيز مقاومة الطوبج للحريق.

أخيراً، تم تقديم توصيات للاستفادة الأمثل من الطوبج الأرضي المضغوط مع مساحيق الخشب ورماد الخشب المستقر بالأسمنت في البناء. تم التأكيد على المزايا البيئية والاقتصادية والاجتماعية.

الكلمات الرئيسية: طوبج التربة المضغوطة، رماد الخشب، نشارة الخشب، الأسمنت

Abstract

This memory discusses a study on the use of compressed earth bricks (BTC) with wood powders and stabilized wood ash with cement. The main objective of this research is to explore the potential for improving the properties of compressed earth bricks by adding these local and sustainable materials.

A review of previous literature was conducted to understand the previous research on compressed earth bricks, wood powders, and wood ash and their role in construction. Laboratory experiments were then carried out to assess the technical performance of compressed earth bricks made using different ratios of wood powders and cement-stabilized wood ash.

The results were analysed and discussed, with a focus on the impact of adding wood powders and wood ash on the properties of compressed earth bricks. The results showed that the addition of these materials contributed to improving the mechanical strength of the bricks.

Finally, recommendations were provided for optimizing the use of compressed earth bricks with wood powders and cement-stabilized wood ash in construction. The environmental, economic, and social benefits were emphasized.

Keywords: Compressed earth brick, wood ash, wood chips, cement.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	15
CHAPITRE I	18
1.1 Introduction	19
1.2 Techniques de construction en terre	19
1.3 Blocs de terre comprimée (BTC)	20
1.4 Diverses variétés de blocs de terre comprimée	21
1.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde	22
1.6. L'utilisation de la terre dans la construction	23
1.6.1. Définition	23
1.6.2. La composition	24
1.6.3. Quelques rappels sur le matériau argileux	24
1.6.3.1. Structure	24
1.6.3.2. Les différentes catégories d'argiles	25
1.6.3.3. Les différents types d'argiles	27
1.6.3.3.1. La kaolinite	27
1.6.3.3.2. La montmorillonite	28
1.6.3.3.3. L'illite	29
1.7 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre	30
1.7.1 Texture ou Granularité	30
1.7.2 La plasticité	31
1.7.3. La compressibilité	31
1.7.4 La cohésion	32
1.8. Les avantages et les inconvénients de brique de terre comprimé	32
1.8.1. Les avantages principaux	32
1.8.2. Les inconvénients principaux	33
1.9 Stabilisation	33
1.9.1 Définition	33
1.9.2 Objectifs	34
1.9.3 Procédés	34
1.9.3.1 Stabilisation mécanique	34
1.9.3.2 Stabilisation physique	34
1.9.3.3 Stabilisation chimique	35
1.9.4 Densification par compression	35
1.9.4.1 Méthodes de compression	36
1.9.4.2 Influence de la teneur en eau sur la densité	36
1.9.4.3 Influence de l'énergie de compactage	38

1.9.5 Stabilisation au ciment	39
1.9.5.1 Généralités	39
1.9.5.2 Mécanisme de stabilisation	40
1.9.5.3 Efficacité et dosage	42
1.9.5.4 Effets sur les propriétés du matériau stabilisé	43
A. <i>Effet sur la densité</i>	43
B. <i>Effet sur la résistance mécanique</i>	44
C. <i>Effet sur l'absorption totale</i>	46
1.9.6 Stabilisation à la chaux	47
1.9.6.1 Généralités	47
CHAPITRE II	49
2.2. Les fibres	50
2.2.1. Définition	50
2.2.2. Différents types de fibres	50
A. <i>Les fibres naturelles</i>	50
• Les fibres végétales :	51
• Les fibres animales :	51
• Les fibres minérales :	52
B. <i>Les fibres synthétiques</i>	52
C. <i>Les fibres artificielles</i>	52
2.3. Les fibres végétales	53
2.3.1 Définition de la fibre végétale	53
2.3.2 Classification des fibres végétales	53
2.3.3 Différentes fibres végétales	53
2.3.3.1 <i>L'abaca</i>	54
2.3.3.2 <i>Le lin</i>	54
2.3.3.3 <i>Le chanvre</i>	55
2.3.3.4 <i>Le coton</i>	56
2.3.3.5 <i>Le kénaf</i>	57
2.3.3.6 <i>Le jute</i>	57
2.3.3.7 <i>Le sisal</i>	58
2.3.3.8 <i>La ramie</i>	59
2.3.3.9 <i>Le coco</i>	59
2.3.3.10 <i>L'alfa</i>	60
2.3.3.11 <i>Palmier dattier</i>	60
CHAPITRE III	62
3.1. Introduction	63
3.2 Caractéristiques mécaniques	67
3.2.1 Essai Proctor	68
3.2.2 La résistance mécanique	70
CHAPITRE IV Résultats et discussion	72

<i>4.1 Introduction</i>	<u>72</u>
<i>4.2 Corrélation entre les valeurs du model et de l'expérimentales</i>	<u>72</u>
<i>4.3. Évaluation des effets des facteurs</i>	<u>73</u>
<i>4.4. Loi mathématique</i>	<u>75</u>
<i>4.5. Analyse de la variance</i>	<u>75</u>
<i>4.6. Surface de réponse</i>	<u>77</u>
<i>4.6. Conclusion</i>	<u>78</u>
<i>Conclusion générale</i>	<u>80</u>
<i>Références bibliographiques</i>	<u>83</u>

Liste des figures

Figure 1 Diverses techniques de construction en terre [1]	20
Figure 2 Diverses produits de bloc de terre comprimée [1]	22
Figure 3 Maison Palmier à Marrakech (Maroc) [4]	22
Figure 4 Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau (France) [4]	23
Figure 5 Atelier électronique, Ecole en Auroville (Inde) [4]	23
Figure 6 Une structure d'un feuillet de phyllosilicate 2 : 1 [11]	25
Figure 7 Modèle Structure de la kaolinite [14].....	27
Figure 8 Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [15]	28
Figure 9 Modèle de la structure de la montmorillonite [15].....	29
Figure 10 Modèle de la structure de la montmorillonite [17].....	29
Figure 11 Modèle de la structure de l'illite [15]	30
Figure 12 Effet du compactage sur les vides des sols. [24]	36
Figure 13 Courbe type de dureté (résistance à la compression et densité) 25].....	36
Figure 14 Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).....	37
Figure 15 Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage sur la structure du sol[21].....	38
Figure 16 La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage. [26]	39
Figure 17 Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression. [27]	39
Figure 18 Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).	43
Figure 19 Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée (Kerali, 2001)	44
Figure 20 Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004)	45
Figure 21 Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne	45
Figure 22 Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment (Venkatrama,2005).....	46

Figure 23 Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment (Meukam, 2004).....	47
Figure 24 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013).....	51
Figure 25 Fibre de l'abaca.....	54
Figure 26 Fibre de lin.....	55
Figure 27 Fibre de chanvre.....	56
Figure 28 Fibre de coton.....	56
Figure 29 Le kénaf.....	57
Figure 30 Fibre de jute.....	58
Figure 31 Fibre de sisal.....	58
Figure 32 Fibre de ramie.....	59
Figure 33 Fibre de coco.....	60
Figure 34 L'alfa.....	60
Figure 35 Fibre de palmier dattier.....	61
Figure 36 Exécution des essais Proctor normal et modifié.....	68
Figure 37 Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal.....	69
Figure 39 Essai de compression.....	71
Figure 41 Corrélation entre les valeurs expérimentales et celles du modèle de résistance à la compression à 7 jours.....	73
Figure 42 Degré d'influence de différents facteurs sur la résistance à la compression.....	74
Figure 43 surface de réponse relation entre CB et C.....	77
Figure 44 surface de réponse relation entre C et FB.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1 Classements des phyllosilicates, d'après (Caillère, 1959) [12], complétée par (Mitchell, 1993) [13]	26
Tableau 2 Résultats d'essai Proctor	70
Tableau 3 Mélange avec le pourcentage de ciment et cendre de bois	70
Tableau 4 Evaluation de la contribution des facteurs d'effet.....	76

Liste d'abréviation

BTC : brique de terre comprimée

RC7 : résistance à la compression à 7 jours

C : le facteur Ciment

CB : Cendre du bois

FB : fibre de bois

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les trouvailles faites lors de fouilles ou d'études dans des sites archéologiques situés dans de nombreux endroits différents sur la planète montrent la connaissance et la compétence des humains dans l'utilisation de méthodes de construction basées sur la terre crue depuis le début de l'histoire organisée de l'humanité. Environ un tiers de la population mondiale réside dans des habitations construites à partir de briques ou de blocs de terre crue.

Bien que l'homme ait eu accès à une large gamme de matériaux de construction grâce au développement technologique considérable des derniers siècles, la construction en terre crue est en train de faire un retour en force dans de nombreux pays, même les pays industrialisés, grâce aux différentes techniques de production qui ont été développées et soutenues par la recherche scientifique.

La terre est largement utilisée dans la construction en raison de sa disponibilité et de sa proximité sur les sites de construction, en plus de sa facilité de mise en œuvre avec peu d'outils nécessaires, souvent d'origine paysanne. C'est pourquoi la construction en terre crue est principalement utilisée dans les zones rurales, bien qu'il existe de nombreux exemples de construction en terre crue en milieu urbain.

Les bénéfices de l'utilisation de la terre crue comprennent une faible consommation d'énergie lors de sa construction, ainsi que des qualités esthétiques agréables et une bonne inertie thermique. Ces avantages permettent d'avoir une habitation fraîche en été et de conserver la chaleur en hiver. Néanmoins, les constructions en terre crue présentent certains défis tels qu'une résistance réduite, une tendance à se fissurer en raison du retrait et une sensibilité à l'eau.

Depuis l'Antiquité jusqu'à aujourd'hui, les humains ont cherché à améliorer les performances et la résistance de la terre en utilisant divers moyens de stabilisation, ce qui a conduit à la création de plusieurs produits à base de terre tels que l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) et bien d'autres.

En ce qui concerne l'histoire de la construction en terre, la technique de bloc de terre comprimée (BTC) est une méthode relativement nouvelle qui permet de produire des blocs avec une grande flexibilité en termes de maçonnerie. Il peut être utilisé aussi bien comme matériau de remplissage dans une structure poteau-poutre que comme matériau principal dans un mur porteur. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques du BTC, telles que la réduction de sa porosité, des variations de volume (gonflement et retrait), et l'amélioration de sa résistance à

l'érosion causée par le vent et la pluie (en réduisant l'abrasion de surface et la perméabilité du bloc), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés, tels que le ciment, la chaux, le bitume, les fibres, et d'autres.

La technique d'armature des blocs de terre comprimée (BTC) à l'aide de fibres est une méthode couramment utilisée dans le monde depuis l'Antiquité, notamment avec l'utilisation de paille. Aujourd'hui, même dans les productions modernes et industrielles d'adobe aux États-Unis, la paille est souvent utilisée en combinaison avec du bitume. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées, mais les fibres sont également utilisées dans la construction en torchis, en terre-paille, en bauge, ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (Houben, 2006) [1]. Les fibres synthétiques sont généralement utilisées pour renforcer les sols afin d'augmenter leur résistance à la compression et au cisaillement (Estabragh, 2011 ; Prabakar, 2002).

Bien que l'utilisation de liants et de bitume pour la stabilisation des blocs de terre comprimée (BTC) améliore actuellement leurs propriétés mécaniques et leur imperméabilité à l'eau, selon Houben (1994) [2], l'utilisation de fibres pour la stabilisation des BTC reste controversée parmi les chercheurs.

En Algérie, la construction en terre est une pratique courante depuis longtemps, surtout dans les zones rurales et arides. Récemment, il y a eu un regain d'intérêt pour ce matériau, principalement pour répondre à une partie du programme de logement rural (environ 40 %) et pour s'adapter à la nouvelle réglementation internationale sur le développement durable. En effet, une loi sur la promotion des énergies renouvelables a été adoptée en août 2004 (Benouali, 2011) [25].

Cela montre que l'Algérie dispose d'une ressource potentielle importante pour la fabrication de BTC renforcés de fibres, en utilisant les déchets agricoles disponibles localement. Cela pourrait contribuer à la valorisation de ces déchets et à la promotion d'une économie circulaire et durable. De plus, la construction en terre renforcée de fibres pourrait répondre aux besoins de logement abordable et durable dans les zones rurales et désertiques de l'Algérie.

Cela semble être un objectif très intéressant et pertinent, surtout compte tenu de la pénurie d'habitat dans les zones rurales de l'Algérie et des conditions climatiques sévères de la région sud. L'utilisation de fibres végétales locales et renouvelables pour renforcer le BTC peut contribuer à produire des matériaux de construction plus résistants et durables, tout en réduisant l'impact environnemental et en répondant aux besoins locaux. L'analyse de la sensibilité à l'eau du BTC renforcé avec des fibres est également importante pour évaluer la résistance à l'humidité

et la durabilité du matériau, ce qui peut être critique dans les conditions climatiques de la région sud de l'Algérie.

Ce mémoire est divisé en deux parties :

- La première partie se concentre sur la synthèse bibliographique qui offre un aperçu général des techniques de construction en terre, en mettant l'accent sur le bloc de terre comprimée (BTC), les différents modes de stabilisation.
 - La deuxième partie sur les différentes formulations et les résultats et les discussions.
-

CHAPITRE I
Généralités sur la brique de terre comprimée

1.1 Introduction

Depuis plusieurs siècles, la terre est un matériau de construction utilisé dans le monde entier. La plupart des premières habitations ont été construites en terre dans la plupart des pays. Cependant, avec l'évolution de la technologie, la construction en terre a peu à peu diminué en faveur de matériaux modernes tels que le ciment, la chaux, le bitume et le bois, en raison de leur résistance mécanique et à l'eau supérieure. Aujourd'hui, une prise de conscience croissante du réchauffement climatique incite les gens à rechercher des matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement. Bien qu'il ait été considéré comme un matériau pour les pauvres, la terre fait un retour remarqué en tant que matériau de construction durable, abordable et offrant un confort intérieur appréciable [1].

1.2 Techniques de construction en terre

Le programme établi par le groupe *CRA terre* en 1986 a sélectionné huit techniques de construction en terre parmi les différentes options possibles, telles que présentées dans la Figure 1 [1]. Ces huit techniques sont largement utilisées dans le domaine de la construction

-L'adobe, qui est obtenu en mélangeant de la terre avec beaucoup d'eau pour former une pâte plastique. Cette pâte est souvent combinée avec de la paille, puis moulée en blocs avant d'être séchée au soleil.

-Le pisé, qui est un matériau de construction obtenu en compactant de la terre dans des coffrages, couche par couche. La teneur en eau utilisée dans ce processus est généralement plus faible que celle utilisée pour fabriquer l'adobe.

-La terre-paille, qui est fabriquée en mélangeant de la terre avec beaucoup d'eau pour obtenir un liquide épais et homogène. De la paille est ensuite ajoutée à ce mélange. Cependant, pour mettre en œuvre ce matériau, il est nécessaire d'utiliser des éléments porteurs.

-Le torchis, qui est un matériau de construction utilisé pour créer un revêtement pour les murs en colombages. Il est obtenu en mélangeant de la terre argileuse avec de l'eau et des fibres naturelles telles que de la paille, du foin, du crin de cheval ou de la bouse de vache.

-La terre façonnée, qui est un matériau de construction consistant à mélanger de la terre argileuse avec de la paille et de l'eau. Cette mixture est ensuite façonnée comme des poteries pour construire des murs.

Le compactage de la terre est une pratique ancienne qui remonte à des temps lointains, où les artisans se servaient de pilons pour compacter les blocs de terre. Toutefois, l'avènement des machines de compression a progressivement mis de côté cette méthode traditionnelle. Les premières machines sont apparues au XVIII^e siècle, mais ce n'est qu'au XX^e siècle que des machines mécaniques équipées de lourds couvercles ont été inventées pour produire des blocs de terre comprimée en grande quantité. En 1952, l'ingénieur Raul Ramirez a conçu la petite presse "CINVA-RAM" au centre CINVA de Bogota, en Colombie, qui a été largement utilisée à travers le monde. Depuis les années 1970 et 1980, d'autres presses manuelles, mécaniques et motorisées plus avancées ont été développées, favorisant ainsi la production et l'utilisation de blocs de terre comprimée dans le secteur de la construction [3].

1.4 Diverses variétés de blocs de terre comprimée

Actuellement, il y a une grande diversité de produits à base de terre comprimée disponibles sur le marché, comme l'a souligné Houben en 2006 (voir Figure 2) [1].

a. Les blocs massifs : ont généralement une forme prismatique comme des parallélépipèdes, des cubes, des hexagones multiples, etc. Ils sont polyvalents et peuvent être utilisés pour diverses applications.

b. Les blocs creux : contiennent habituellement environ 15 % d'espace vide, mais grâce à des techniques sophistiquées, ce pourcentage peut atteindre 30 %. Les vides intérieurs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs creux sont conçus pour permettre la réalisation de chaînages ou de coffrages perdus.

c. Les blocs alvéolaires : sont plus légers que les autres types de blocs, mais leur fabrication nécessite des moules sophistiqués et des pressions de compression plus élevées que la normale.

d. Les blocs à emboîtements : peuvent potentiellement être utilisés sans mortier, mais leur fabrication nécessite des moules sophistiqués et des pressions de compression plus élevées ou plus basses que la normale, selon le type d'emboîtement.

e. Les blocs parasismiques : ont une forme spécialement conçue pour améliorer leur comportement en cas de séisme ou pour permettre une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques tels que le chaînage.

f. Les blocs spéciaux : sont fabriqués sur mesure pour répondre à des applications spécifiques.



Figure 2 Diverses produits de bloc de terre comprimée [1]

1.5 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde

À travers le monde, de multiples édifices ont été érigés à partir de blocs de terre comprimée, présentant de nombreux avantages sur les plans économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. Quelques exemples captivants incluent la Maison Palmier à Marrakech, au Maroc (voir Figure 3), le Domaine de la Terre à l'Isle d'Abeau, à proximité de Lyon en France (voir Figure 4) et l'Atelier Électronique de l'École à Auroville, en Inde (voir Figure 5) [4].

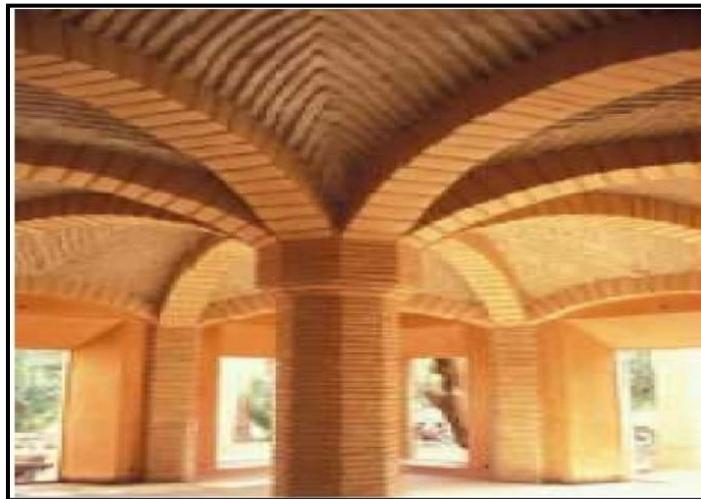


Figure 3 Maison Palmier à Marrakech (Maroc) [4]



Figure 4 Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau (France) [4]



Figure 5 Atelier électronique, Ecole en Auroville (Inde) [4]

1.6. L'utilisation de la terre dans la construction

1.6.1. Définition

Le sol représente la surface supérieure de la croûte terrestre, constituée d'un mélange complexe de matériaux de tailles variables. Il remplit un rôle crucial en soutenant les infrastructures et la vie. La formation du sol résulte de la transformation de la roche mère, impliquant le déplacement de ses constituants à travers divers processus. Ces processus de migration engendrent une pléthore de types de sols, se distinguant par leurs propriétés distinctives. Dans le cadre de la construction, le sol est considéré comme utilisable lorsque ses composantes organiques ont été réduites ou éliminées [5].

1.6.2. La composition

La composition de la terre se compose de divers éléments de tailles variées, tels que des graviers, du sable, des limons et de l'argile ($<2\mu\text{m}$). Les éléments inactifs, à savoir les graviers et le sable, forment le squelette solide tandis que les limons et l'argile jouent le rôle de liant, semblable au ciment dans le béton [5]. Le comportement du sol est influencé par la proportion d'éléments fins et grossiers. Une forte proportion d'argile peut causer un gonflement du sol lorsqu'il est en présence d'eau, suivi d'une contraction lorsqu'il sèche. En revanche, une forte proportion d'éléments grossiers garantit la stabilité du sol, qu'il soit humide ou sec.

L'utilisation de matériaux contenant une proportion importante d'éléments fins est déconseillée pour la construction [6].

Lors de la production de blocs de terre comprimée, une proportion significative d'argile est nécessaire pour agir en tant que liant. Il est important de noter certaines propriétés qui influencent le comportement du sol.

1.6.3. Quelques rappels sur le matériau argileux

Les argiles sont des roches constituées de feuillets de phyllosilicates riches en alumine et contenant plus ou moins d'eau. Elles représentent plus de 50 % des roches sédimentaires, seules ou associées à d'autres roches. Ces particules sont extrêmement fines, mesurant environ $2\mu\text{m}$. Lorsqu'elles sont imbibées d'eau, les argiles deviennent plastiques et imperméables [7]. Elles sont largement présentes dans la nature et faciles à exploiter. L'argile est une ressource naturelle utilisée dans de nombreux domaines, notamment la construction (matériaux), la fabrication de polymères, le raffinage d'huile alimentaire, la médecine et la cosmétique. Ses différentes propriétés chimiques et physiques en font un matériau d'une grande valeur industrielle [8].

1.6.3.1. Structure

Les minéraux silicatés appelés phyllosilicates forment des structures en feuillet bidimensionnel infini, avec des tétraèdres de SiO_4 empilés les uns sur les autres. Ces tétraèdres sont combinés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport de 2 pour 1 ou 1 pour 1 pour former les feuillets tétraédriques et octaédriques.

Selon Plupart (2002) [9], les phyllosilicates sont également connus sous le nom de silicates lamellaires. Les différents minéraux sont identifiés par l'organisation de leurs couches tétraédriques et octaédriques (voir Figure 1-6). La structure des phyllosilicates est formée par un squelette d'ions O^{2-} et OH^- . Les anions (O^{2-} et OH^-) occupent les sommets des liaisons

tétraédriques (O_2^-) et octaédriques (O_2^- et OH^-). Les cations de tailles variables (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) se placent dans les cavités des unités structurales élémentaires. Ces éléments sont organisés en plans pour former des couches tétraédriques et octaédriques, et le nombre de plans détermine l'épaisseur du feuillet.

L'espace entre deux feuillets parallèles est appelé espace interfoliaire. Si deux tiers des cavités de la couche octaédrique sont occupés par Al^{3+} ou un autre ion métallique trivalent, cette structure est dite dioctaédrique. La substitution isomorphe dans les groupes tétraédriques ($Si^{4+} \leftrightarrow Al^{3+}$, Fe^{3+}) et/ou octaédriques ($Al^{3+} \leftrightarrow Mg^{2+}$, Fe^{2+} ou $Mg^{2+} \leftrightarrow Li^+$) entraîne un déficit de charge qui est compensé à l'extérieur du feuillet par des cations compensateurs [10].

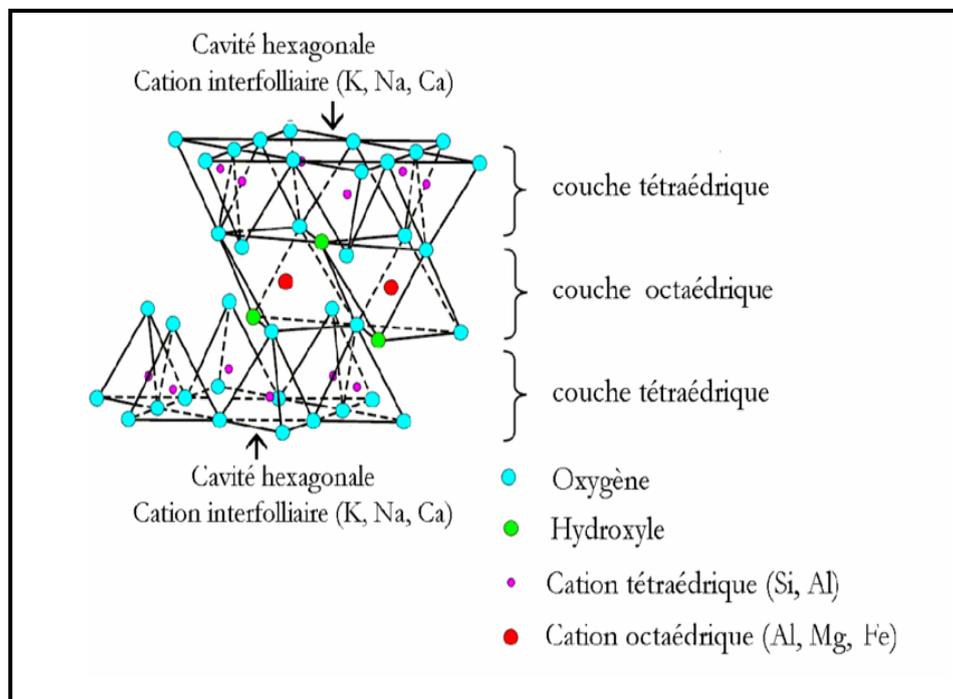


Figure 6 Une structure d'un feuillet de phyllosilicate 2 : 1 [11]

1.6.3.2. Les différentes catégories d'argiles

Les argiles sont catégorisées en fonction de l'épaisseur et de la structure de leurs feuillets, ce qui donne lieu à quatre groupes les plus fréquents.

Le premier groupe comprend un feuillet constitué d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique, mesurant 7 Å d'épaisseur. Ce type de feuillet est identifié par T : O ou 1 : 1.

Le deuxième groupe est composé d'un feuillet constitué d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques, mesurant 10 Å d'épaisseur. Ce type de feuillet est identifié par T : O : T ou 2 : 1.

Le troisième groupe est constitué de feuillets alternant des couches T : O : T et des couches octaédriques interfoliaires, mesurant 14 Å d'épaisseur.

Enfin, les minéraux argileux interstratifiés présentent des feuillets d'épaisseurs variables résultant du mélange régulier des différents groupes présentés dans le tableau 1. Pour classer les phyllosilicates, la valeur de la charge permanente du feuillet est utilisée comme critère, tel que défini par les travaux de McKenzie en 1975 et Brindley en 1966 [11].

Tableau 1 Classements des phyllosilicates, d'après (Caillère, 1959) [12], complétée par (Mitchell, 1993) [13].

Nature du feuille	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemple
1 : 1	Pas de cation ou seulement de l'eau	Kaolinite	Dioctaédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cation	Pyrophyllites	Dioctaédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Dioctaédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique
	Cations monovalents non hydratés	Micas	Dioctaédrique	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non hydratés	Micas durs	Dioctaédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Dioctaédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2 : 1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Dioctaédrique	Sépiolite, Palygorskite

1.6.3.3. Les différents types d'argiles

Le tableau 1 répertorie plusieurs espèces qui composent différentes familles d'argiles. Les trois familles d'argiles les plus répandues, à savoir la kaolinite, l'illite et la montmorillonite, se retrouvent à diverses proportions dans le sol.

1.6.3.3.1. La kaolinite

Les kaolinites sont des minéraux argileux de type 1:1 ou T-O, qui ont une épaisseur de 7,2 Å, comme illustré dans les figures 7 et 8. Lorsque deux feuillets sont superposés, les H⁺ de la surface inférieure et les O⁻ de la surface supérieure créent une forte liaison hydrogène (O-H) entre eux, qui, combinée à la liaison de Van der Waals, assure une grande stabilité et une résistance à l'action de l'eau. Par conséquent, les minéraux argileux kaolinites sont stables et leurs structures élémentaires sont protégées contre l'eau. La forte liaison hydrogène entre les feuillets est expliquée par la faible valeur de la surface spécifique (45 m² g⁻¹) et le grand nombre de feuillets par particule de kaolinite

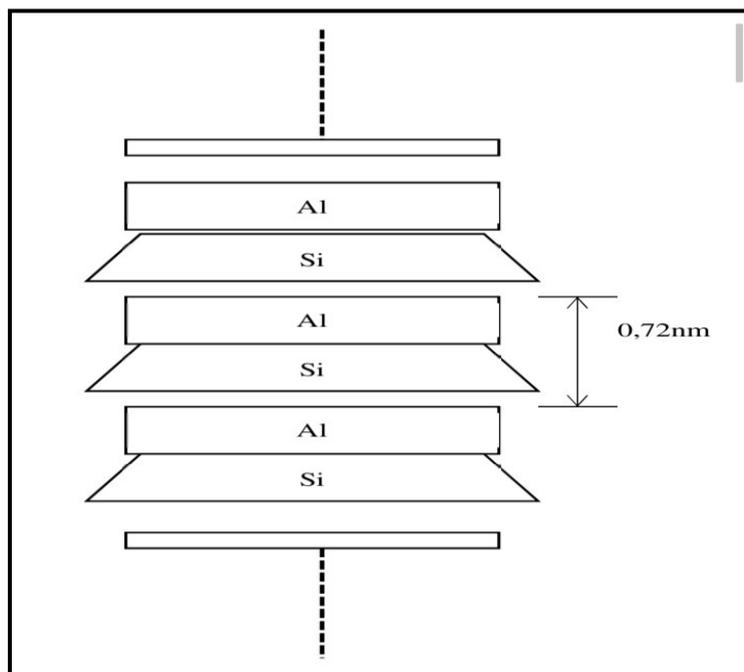


Figure 7 Modèle Structure de la kaolinite [14]

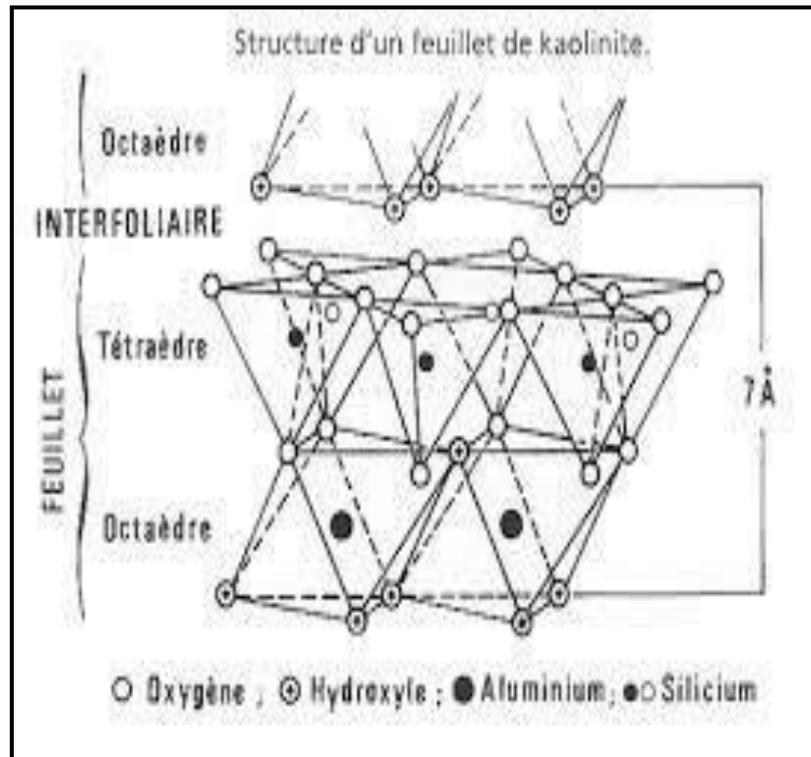


Figure 8 Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [15]

1.6.3.3.2 La montmorillonite

La montmorillonite est constituée de feuilles élémentaires de type 2:1 ou T:O:T, composées de deux couches tétraédriques de silice entourées d'une couche octaédrique d'alumine. Contrairement aux kaolinites, l'empilement des feuilles n'est pas ordonné, chaque feuille étant tournée dans son plan par rapport à la précédente. Cette structure confère à la montmorillonite une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur, estimée à 9,6 Å (voir figure 9 et figure 10). En présence d'eau, la montmorillonite est très sensible et a tendance à gonfler lorsque des molécules d'eau s'infiltreront entre les feuilles, dont l'épaisseur varie de 9,6 Å à 15 Å. Selon la nature du cation compensateur et la présence d'humidité entre les feuilles, leur épaisseur peut augmenter davantage [16].

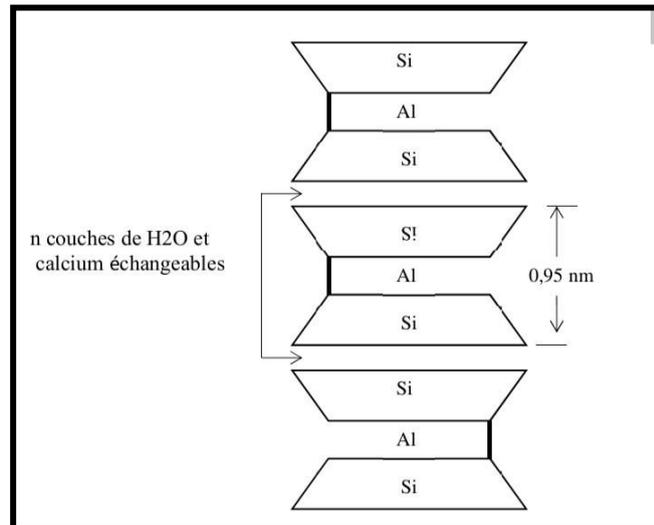


Figure 9 Modèle de la structure de la montmorillonite [15]

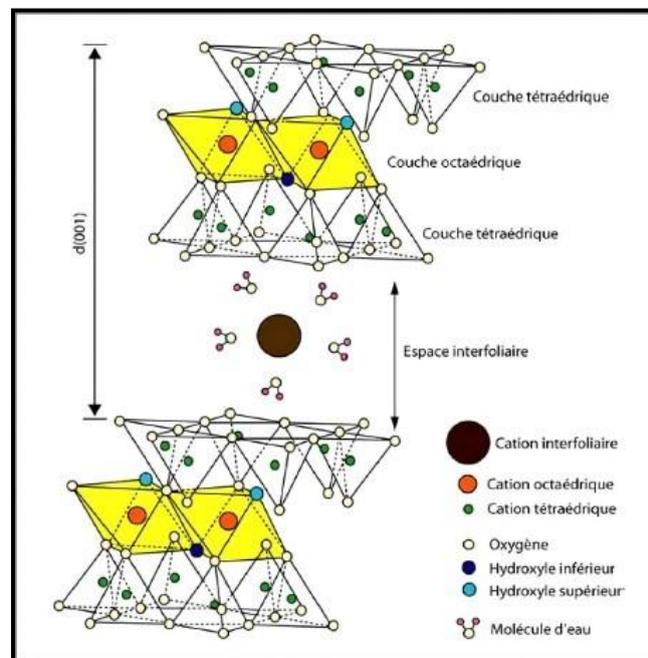


Figure 10 Modèle de la structure de la montmorillonite [17]

1.6.3.3.2. L'illite

La structure de l'illite de type 2 pour 1 est similaire à celle de la montmorillonite, mais avec un déficit de charge dû au remplacement des ions par des cations de potassium K^+ (voir figure 11). Les cations de potassium ont l'avantage de remplir la cavité dans laquelle ils sont logés, assurant ainsi une liaison forte entre les feuillets, ce qui empêche la pénétration des molécules d'eau entre eux tout en maintenant un espace interfoliaire fixe de 9,6 Å. Par conséquent, l'illite est plus stable face à l'eau que la montmorillonite.

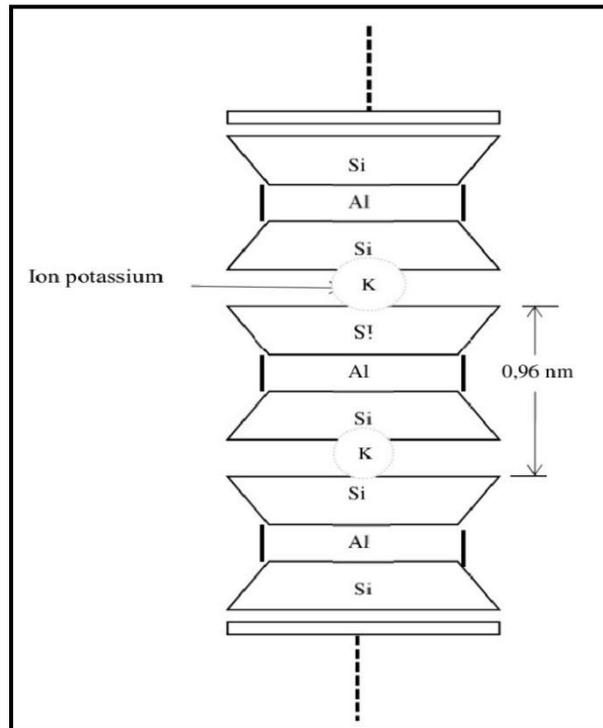


Figure 11 Modèle de la structure de l'illite [15]

1.7 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

Les caractéristiques des sols varient d'une région à l'autre et dépendent de la nature et du mélange complexe des fractions granulaires qui les composent. En effet, la fraction granulaire prédominante est souvent ce qui définit les propriétés fondamentales du sol et régit son comportement. Ces propriétés incluent des aspects chimiques tels que la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates, ainsi que de nombreux aspects physiques tels que la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. Bien que la compréhension de ces propriétés chimiques et physiques permette de déterminer la qualité et le comportement du sol pour la construction, il n'est pas toujours nécessaire de les connaître en détail. Il est important de se concentrer sur les quatre propriétés fondamentales du sol, à savoir la texture ou la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion, selon Houben (2006) [1].

1.7.1 Texture ou Granularité

La texture ou granularité de la terre peut être déterminée en utilisant l'analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers tels que les graviers, les sables et les silts,

ainsi que l'analyse sédimentométrique pour les fractions fines argileuses. Les éléments résistants tels que les graviers et les sables fournissent la résistance de la terre, tandis que les argiles sont responsables de la cohésion globale et contrôlent la plasticité et la réaction de la terre à l'humidité, affectant ainsi le retrait et le gonflement [25]. De plus, la réaction pouzzolanique, qui est une réaction chimique entre l'argile et la chaux, produit de nouveaux produits qui contribuent efficacement à la résistance finale d'une terre stabilisée à la chaux (et au ciment) [17]. Les silts, quant à eux, ont une fonction intermédiaire moins définie.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et référente aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante [1].

– 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

1.7.2 La plasticité

La plasticité d'un sol correspond à sa capacité à se déformer sans se fissurer ou se pulvériser de manière élastique. Les limites d'Atterberg, telles que la limite de liquidité (LL), la limite de plasticité (LP) et l'indice de plasticité (IP), sont utilisées pour mesurer la plasticité et définir les différentes limites entre les états de consistance des sols fins. Les limites d'Atterberg sont également utilisées pour l'identification et la classification des sols, ainsi que pour spécifier les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols. L'IP est un moyen indirect de mesurer les quantités et les affinités d'humidité de l'argile dans le sol. Les sols sableux et limoneux ont généralement des valeurs d'IP faibles, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols ayant des valeurs d'IP élevées sont considérés comme très plastiques, compressibles et cohérents.

1.7.3. La compressibilité

La compressibilité du sol se réfère à sa capacité à être comprimé jusqu'à son maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité spécifiques (teneur en eau optimale ou

TEO). Lorsqu'une force est appliquée sur un volume de sol, il est comprimé et l'indice des vides diminue en conséquence. Si la densité du sol peut être augmentée, la porosité sera réduite, ce qui rendra l'eau plus difficile à pénétrer. Cette propriété est due à une imbrication plus étroite des particules, ce qui diminue les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.

1.7.4 La cohésion

La cohésion d'un sol se réfère à sa capacité à résister à la rupture ou à la fissuration lorsqu'une force de traction est appliquée. Cette propriété est influencée par les caractéristiques de la liaison ou de la cimentation de son mortier grossier, qui lie les grains inertes ensemble. Les argiles ont un impact important sur la quantité et la qualité collante du mortier grossier, et donc sur la cohésion du sol. Les mortiers grossiers sont classés en fonction de leur composition en sable, maigre, moyen, gras et argiles [1], Pour mesurer la cohésion, l'essai de traction est généralement réalisé sur un échantillon de sol humide.

1.8. Les avantages et les inconvénients de brique de terre comprimé

1.8.1. Les avantages principaux

- **Durabilité** : Les briques de terre comprimée ont une durée de vie supérieure à celle des briques de terre crue, car elles sont plus denses et résistantes aux intempéries. Elles peuvent durer jusqu'à 100 ans.
- **Isolation thermique** : Les briques de terre comprimée ont une bonne capacité d'isolation thermique, ce qui réduit les besoins en chauffage et en climatisation. Elles ont une conductivité thermique de 0,7 W/m. K, soit environ la moitié de celle des briques en terre cuite.
- **Isolation acoustique** : Les briques de terre comprimée ont également une bonne capacité d'isolation acoustique, ce qui réduit les bruits extérieurs.
- **Matériau écologique** : Les briques de terre comprimée sont fabriquées à partir de matériaux naturels et renouvelables, ce qui en fait un matériau écologique. Elles ne nécessitent pas de cuisson et sont donc économes en énergie.
- **Faible coût** : Les briques de terre comprimée sont relativement peu coûteuses à produire car elles ne nécessitent pas de cuisson et sont fabriquées à partir de matériaux locaux.
- **Facilité de construction** : Les briques de terre comprimée sont faciles à travailler et peuvent être coupées ou sculptées pour s'adapter à des formes spécifiques. Elles peuvent

être assemblées avec un mortier de terre et ne nécessitent pas de compétences particulières pour être posées.

- **Résistance au feu :** Les briques de terre comprimée ont une résistance au feu élevée, ce qui en fait un matériau de construction sûr.
- **Résistance aux séismes :** Les briques de terre comprimée ont une bonne résistance aux séismes, grâce à leur capacité à se déformer et à absorber les chocs.

1.8.2. Les inconvénients principaux

- **Faible résistance à l'eau :** Les briques de terre comprimée peuvent être vulnérables à l'humidité et à l'eau, ce qui peut entraîner une détérioration de leur structure et de leur résistance au fil du temps.
- **Sensibilité aux changements de température et d'humidité :** Les briques de terre comprimée peuvent se dilater et se contracter en réponse aux variations de température et d'humidité, ce qui peut entraîner des fissures ou des déformations.
- **Coûts de fabrication élevés :** La production de briques de terre comprimée nécessite des équipements spéciaux et des compétences techniques, ce qui peut rendre le processus de fabrication plus coûteux que pour d'autres types de briques.
- **Limitations de taille :** En raison des contraintes liées au processus de fabrication, les briques de terre comprimée peuvent avoir des limites de taille, ce qui peut limiter leur utilisation dans certains types de projets de construction.

1.9 Stabilisation

1.9.1 Définition

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a donné une définition de la stabilisation des sols comme étant la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes adaptées à une application particulière [29]. Toutefois, la stabilisation est un processus complexe car de nombreux paramètres interviennent. Il est nécessaire de prendre en compte plusieurs éléments tels que les propriétés du sol, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en

œuvre de la terre choisie pour le projet ainsi que la maintenance du projet réalisé [1]. Par conséquent, la stabilisation des sols nécessite une approche méthodique et une analyse minutieuse de toutes les variables impliquées.

1.9.2 Objectifs

Winterkorn (1975), les Nations Unies (1992) et Symons (1999) ont identifié les principaux objectifs de la stabilisation des sols. Ces objectifs incluent l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol en augmentant les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement, la réduction de la porosité et des variations de volume pour limiter le retrait et le gonflement à l'eau, et l'amélioration de la résistance à l'érosion due au vent et à la pluie en réduisant l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau. La réalisation de ces objectifs est essentielle pour garantir la stabilité et la durabilité des infrastructures et des constructions construites sur le sol, tout en préservant l'environnement en réduisant les effets de l'érosion

1.9.3 Procédés

Selon Winterkorn (1975), les Nations Unies (1992) et Webb (1994), il existe trois procédés de stabilisation :

1.9.3.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique désigne le processus de stabilisation du sol par compactage, qui modifie les propriétés du sol telles que la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité en agissant sur la structure du sol. Cela permet d'améliorer la résistance et la stabilité du sol en augmentant sa capacité de charge et en réduisant sa sensibilité aux variations de la teneur en eau. Le compactage peut être effectué par diverses techniques telles que le rouleau vibrant, le vibro-compacteur ou encore le compactage à haute énergie. La stabilisation mécanique est une méthode courante et efficace pour renforcer les sols dans divers projets de construction.

1.9.3.2 Stabilisation physique

Il est possible de modifier les propriétés d'un sol en agissant sur sa texture, notamment en effectuant un mélange contrôlé de différentes fractions de grains telles que l'argile et le sable. Ce processus est appelé "stabilisation granulométrique". En mélangeant différentes fractions de sol, on peut obtenir des propriétés mécaniques plus stables et améliorer la résistance du sol à la compression, à la traction et au cisaillement. Cette méthode permet également de réduire la porosité et les variations de volume du sol, ce qui peut réduire les risques de retrait et de

gonflement à l'eau. La stabilisation granulométrique est une technique courante de modification des propriétés du sol, utilisée dans de nombreux projets de construction et d'aménagement du territoire.

1.9.3.3 Stabilisation chimique

La stabilisation des sols peut également être effectuée en ajoutant des matériaux ou des produits chimiques qui modifient les propriétés du sol. Ces ajouts peuvent créer une réaction physicochimique avec les particules du sol ou créer une matrice qui lie ou enrobe les particules. Certains matériaux couramment utilisés pour la stabilisation des sols comprennent le ciment, la chaux, le bitume et des 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. Il existe deux méthodes principales pour le traitement du sol avec des produits chimiques : le traitement dans la masse, qui implique l'ajout d'une quantité minimale de stabilisant dans le sol, et le traitement de surface, qui consiste en l'application d'un enduit, d'un badigeon ou d'un hydrofuge pour protéger la surface exposée du sol.

1.9.4 Densification par compression

La compression est une technique qui permet de réduire l'espace vide dans un sol, entraînant une augmentation de sa densité sèche (voir figure 12) [24]. Il y a une relation directe entre la densité sèche et la résistance mécanique pour tous les matériaux. Plus le matériau est comprimé, plus sa résistance mécanique est élevée [18]. Par conséquent, pour une composition et un dosage identique, la force du béton est d'autant plus grande qu'il est dense, tandis que les pierres les plus denses présentent les résistances mécaniques les plus élevées. Ce phénomène est également observé pour les terres, bien que les densités atteintes restent relativement faibles. La figure 13 illustre qualitativement l'évolution de la résistance en compression en fonction du poids spécifique sec pour ces trois types de matériaux. L'augmentation de la densité sèche, en particulier pour les valeurs élevées de densité, présente un intérêt majeur pour la résistance mécanique des matériaux [6]. De plus, la densification permet de réduire la vitesse d'infiltration de l'eau dans le matériau stabilisé et durci, ce qui améliore sa durabilité. Toutefois, il est important de veiller à ce qu'il y ait suffisamment d'eau pendant le processus de compression pour permettre une hydratation normale des minéraux du sol et des stabilisants tels que la chaux ou le ciment [33].

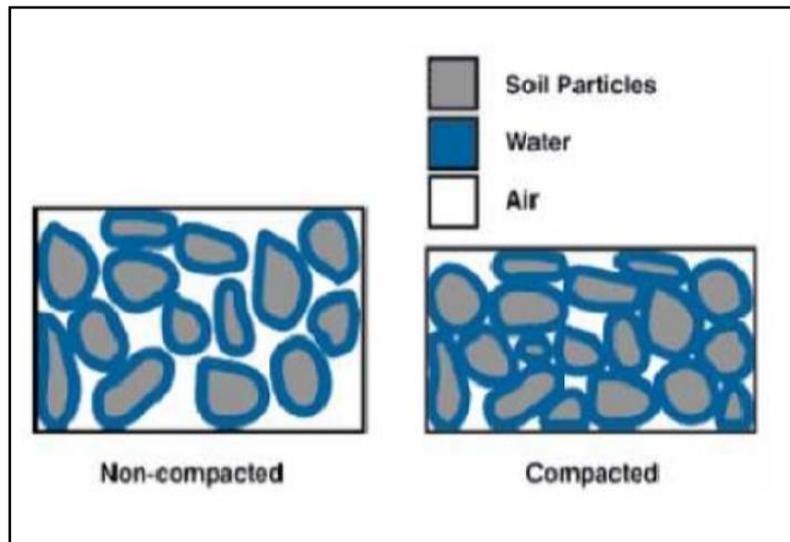


Figure 12 Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).

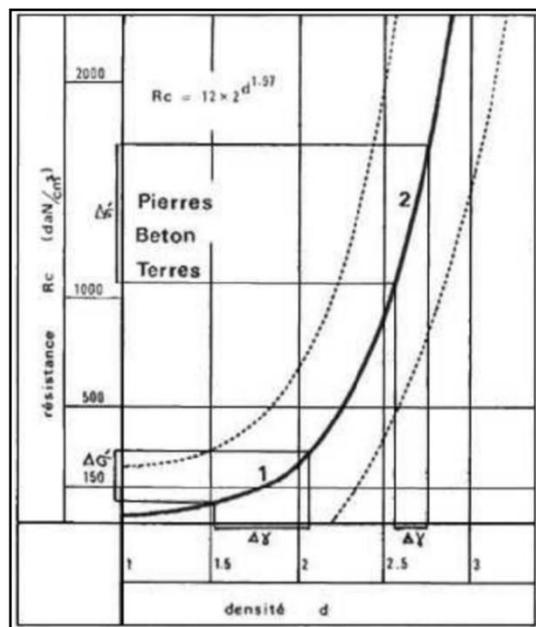


Figure 13 Courbe type de dureté (résistance à la compression et densité) (Doat, 1979)

1.9.4.1 Méthodes de compression

La technique de densification a un effet considérable sur la force finale du matériau [6], Il y a principalement quatre techniques de compression [1]: la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par malaxage.

1.9.4.2 Influence de la teneur en eau sur la densité

Plusieurs variables physiques ont un effet sur la densité d'un sol de terre comprimée, y compris la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la technique de

compactage et la contrainte de compactage. Cependant, selon Burrough (2001), la teneur en eau est le facteur le plus crucial pour les propriétés de la terre comprimée. La relation entre la teneur en eau et la densité sèche est similaire pour la plupart des sols sous une contrainte de compactage donnée (voir figure 14, USACE, 2000) [34]. Pour atteindre la densité maximale d'un sol, son indice de vides doit être minimal, ce qui se produit pour une teneur en eau optimale. Un sol trop sec présente une résistance élevée entre les grains de sol, tandis qu'un sol trop humide absorbe une partie importante de l'énergie de compactage, ce qui diminue l'efficacité de la densification.

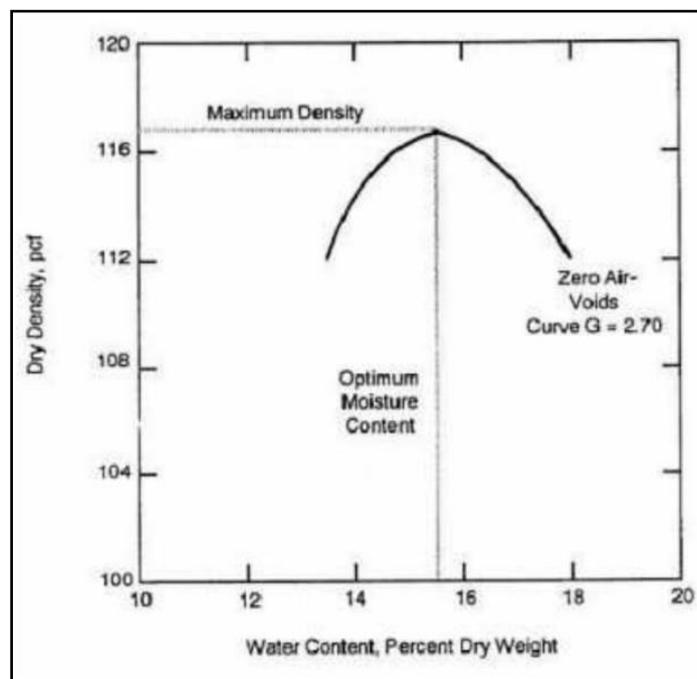


Figure 14 Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).

La détermination de la TEO avec la presse à bloc est une méthode simple et pratique. Elle consiste à mesurer la teneur en eau de plusieurs échantillons de sol compressé avec des teneurs en eau différentes. Pour chaque échantillon, la quantité d'eau ajoutée est progressivement augmentée jusqu'à ce que la résistance mécanique maximale soit atteinte. La teneur en eau correspondant à cette résistance est considérée comme la TEO. Cette méthode donne des résultats plus précis et représentatifs des conditions de fabrication des briques comprimées, car elle prend en compte les paramètres réels de la fabrication tels que la méthode de compactage, la contrainte de compactage et la granularité des particules de sol [22].

1.9.4.3 Influence de l'énergie de compactage

L'énergie de compactage a un impact sur la densité sèche d'un sol et sur sa teneur en eau optimale (TEO), indépendamment de sa méthode ou de son type. Cette observation a été mise en évidence par plusieurs auteurs (Bergado, 1996 ; Winterkorn, 1975 ; USACE, 2000), qui ont constaté une diminution de la TEO et une augmentation de la densité sèche en fonction de l'augmentation de l'énergie de compactage, comme l'illustre la Figure 15. Toutefois, il convient de noter que des énergies de compactage excessivement élevées peuvent entraîner des effets secondaires indésirables sur la qualité du matériau. Par exemple, une pression excessive pendant la compression peut causer le laminage des blocs fabriqués, comme l'ont signalé Houben (2006) [1].

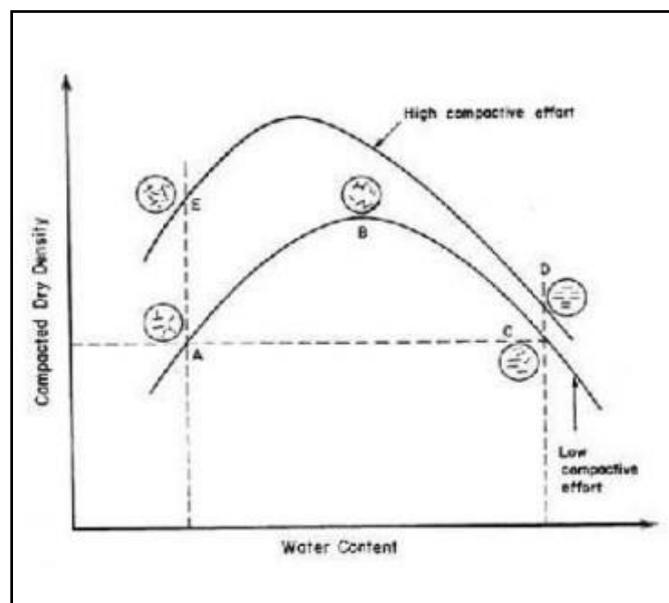


Figure 15 Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage sur la structure du sol (Bergado, 1996).

Les recherches menées par Gooding (Gooding, 1993) ont démontré que l'augmentation de la force de compactage a un impact considérable sur la solidité à la compression des blocs de terre stabilisée avec du ciment (figure 16). De même, les conclusions de l'étude menée par Guettala et al. (Guettala, 2002) ont indiqué que les résistances mécaniques augmentent à mesure que la force de compactage s'accroît, atteignant un optimum de 17,5 MPa. Cependant, au-delà de cette valeur, il y a une diminution de la solidité d'environ 7% lorsque la force de compactage atteint 20 MPa (Figure 17). Ces résultats sont essentiels pour améliorer la production de blocs de terre stabilisée avec du ciment en renforçant leur solidité à la compression.

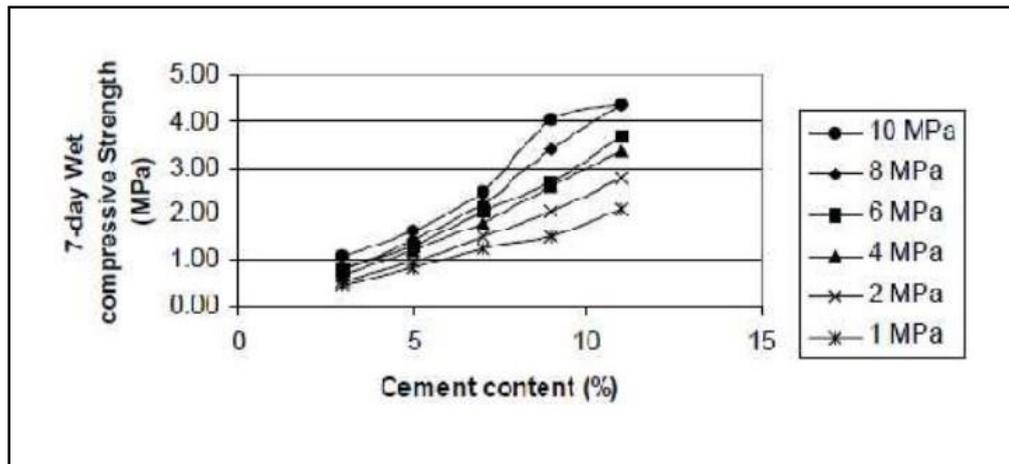


Figure 16 La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding,1993).

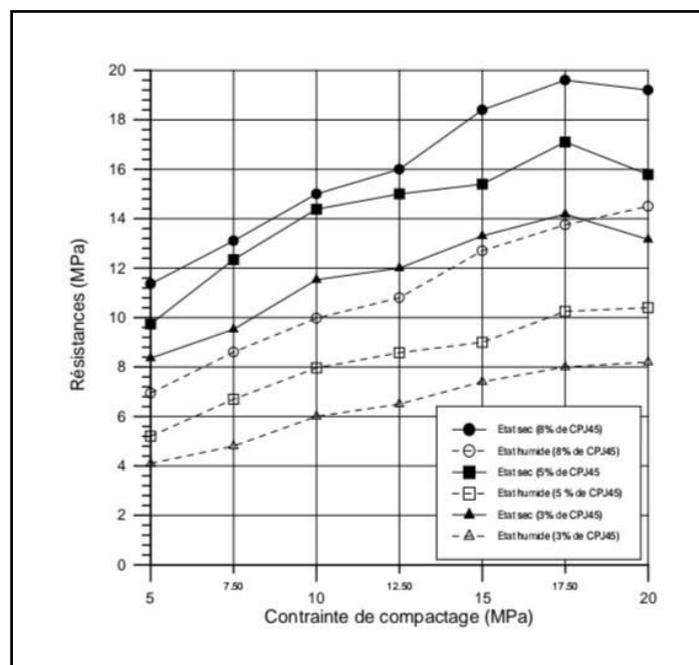


Figure 17 Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).

1.9.5 Stabilisation au ciment

1.9.5.1 Généralités

Les premières tentatives de consolidation routière avec du ciment ont été effectuées aux États-Unis en 1915, tandis que l'utilisation du ciment pour la construction de bâtiments a été développée de manière indépendante en Allemagne dès 1920. Depuis 1935, le sol-ciment est devenu de plus en plus populaire pour la construction des routes et des pistes d'aérodrome aux États-Unis. Aujourd'hui, l'utilisation du ciment pour la consolidation est largement répandue

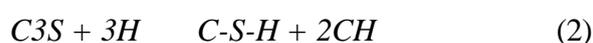
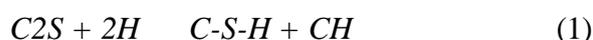
dans le monde entier, que ce soit dans les travaux publics ou dans la construction de bâtiments [1]. Le ciment est considéré comme l'un des meilleurs agents de stabilisation pour les blocs de terre comprimée, car son ajout avant la compression améliore les propriétés du matériau, en particulier sa résistance à l'eau grâce aux liaisons irréversibles qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment agit principalement sur les sables et les graviers, comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. Par conséquent, l'utilisation de terres excessivement argileuses (>30%) est inutile voire nuisible [2].

D'après les recherches de Venuat (1980), tous les types de ciment standard sont en principe appropriés pour la stabilisation des sols, mais les ciments de faible qualité sont préférables car une grande résistance n'est pas nécessaire. Toutefois, selon d'autres experts tels que Doat (1979), le choix du type de ciment doit dépendre de la nature du sol. Pour les sols contenant un certain pourcentage d'argile, l'utilisation d'un ciment riche en alite C3S et en bélite C2S est recommandée, car il produit une grande quantité de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ après hydratation. Verdeyen conseille l'utilisation de ce type de ciment pour les sols dont la teneur en argile ne dépasse pas 20 à 30 % ($I_p < 25\%$) (Verdeyen, 1971).

1.9.5.2 Mécanisme de stabilisation

En effet, la composition de la poudre de ciment peut varier en fonction de différents facteurs tels que le type de ciment, la matière première utilisée et le processus de fabrication. Cependant, les phases principales citées précédemment sont les composants de base du ciment Portland, le ciment le plus couramment utilisé dans la construction. Les phases principales réagissent avec l'eau pour former les produits d'hydratation qui sont responsables des propriétés adhésives et résistantes du ciment. La présence de certaines phases mineures peut également avoir des effets sur les propriétés du ciment, notamment sur sa résistance à l'attaque chimique ou à la corrosion [35].

Ces deux réactions sont exothermiques, c'est-à-dire qu'elles dégagent de la chaleur, ce qui peut être un facteur à prendre en compte lors de la stabilisation d'un sol. En effet, une forte augmentation de la température peut entraîner des fissures ou des déformations dans le matériau stabilisé. De plus, la formation de C-S-H est essentielle pour la résistance mécanique du sol-ciment, car elle agit comme un liant entre les particules de sol et renforce la structure. La portlandite, quant à elle, est un produit secondaire de l'hydratation qui peut cristalliser et affaiblir le matériau si sa quantité est excessive.



Il convient de noter que la réaction (3) peut être préjudiciable pour la résistance du matériau à long terme, car elle peut provoquer un gonflement et une fissuration. C'est pourquoi la quantité de gypse ajoutée au ciment est soigneusement contrôlée lors de sa fabrication.



Cette réaction est similaire à la réaction (3) qui concerne les aluminates tricalciques. La présence de gypse favorise la formation d'ettringite, qui contribue à la résistance du ciment. Cependant, en cas d'excès de gypse, la formation d'ettringite peut être excessive et entraîner une expansion qui endommage le matériau. Il est donc important de contrôler avec précision la quantité de gypse dans le ciment.



En effet, la minéralogie et la granulométrie des sols ne semblent pas avoir une influence significative sur les effets du ciment. Cela s'explique par le fait que la poudre de ciment contient tous les éléments nécessaires pour réagir et former des produits cimentaires. Ainsi, lorsqu'elle est mélangée au sol, le ciment crée des liens physiques entre les particules, ce qui contribue à augmenter la résistance des sols, comme l'a indiqué Tran en 2009.

Cela est exact. Dans le cas des sols pulvérulents, les particules du sol ont une taille plus importante que celle des grains de ciment. Par conséquent, il est possible que ces particules soient revêtues de ciment. Dans ce cas, le ciment peut réagir avec lui-même ou avec le squelette granulaire du sable, comme cela a été souligné dans une publication de l'Organisation des Nations unies en 1992. En effet, dans les sols cohérents, les particules sont souvent plus fines que les grains de ciment, ce qui rend difficile le revêtement de ces particules par le ciment.

Cependant, grâce au compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui devient de plus en plus résistant au fil de l'hydratation, entraînant ainsi une augmentation de la résistance du sol traité [20].

Une réaction en trois étapes se produit avec l'argile lors de l'hydratation du ciment. Tout d'abord, les gels de ciment se forment à la surface des agglomérats d'argile, réagissant rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation. Cependant, cette chaux est vite consommée, ce qui entraîne la dégradation de l'argile. Ensuite, les agglomérats d'argile se désagrègent progressivement, ce qui permet aux gels de ciment de pénétrer en profondeur. Enfin, les gels de ciment et les agglomérats argileux s'interpénètrent intimement, ce qui ralentit l'hydratation mais la maintient.

Effectivement, la nature et la quantité d'argiles présentes dans les sols peuvent avoir une influence importante sur les interactions avec le ciment et donc sur les propriétés mécaniques du sol traité. Certains types d'argiles peuvent interagir de manière préférentielle avec certains

composants du ciment, ce qui peut affecter la formation et la stabilité des produits d'hydratation. De plus, la quantité d'argile peut également jouer un rôle important, car une trop grande quantité peut affecter la porosité et la perméabilité du sol, réduisant ainsi son efficacité comme matériau de construction. En fin de compte, il est important de prendre en compte la nature des argiles présentes dans le sol lors de la conception de mélanges de sol-ciment appropriés pour garantir une efficacité maximale et une durabilité à long terme.

Les réactions de l'argile avec le ciment se produisent en trois étapes distinctes. Tout d'abord, l'hydratation du ciment engendre la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile, qui réagissent ensuite avec la chaux libérée pendant l'hydratation. Cette chaux est rapidement consommée, ce qui entraîne la dégradation de l'argile. Ensuite, les agglomérats d'argile se désagrègent et sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.

Enfin, les gels de ciment et les agglomérats argileux s'interpénètrent intimement, ce qui permet une hydratation plus lente mais persistante. Cette réaction complexe engendre trois structures mélangées distinctes, à savoir une matrice sableuse inerte liée au ciment, une matrice d'argile stabilisée et une matrice de terre non stabilisée [1].

1.9.5.3 Efficacité et dosage

La compression à l'état humide est la méthode la plus efficace pour la stabilisation des blocs de terre comprimée avec du ciment. Les graves et les sables donnent des résultats de résistance à la compression supérieurs aux limons et aux argiles[1]. Ces résultats sont similaires à ceux de Walker (1997) et indiquent que la résistance à la compression diminue avec une augmentation de la teneur en minéraux argileux dans le bloc de terre comprimée stabilisé au ciment (voir figure 18).

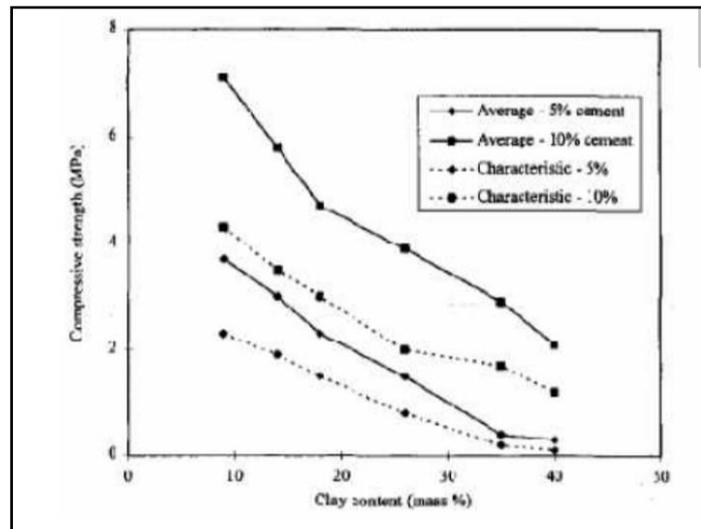


Figure 18 Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment (Walker, 1997).

Afin d'obtenir des résultats satisfaisants, il est généralement recommandé d'utiliser une proportion de ciment d'au moins 5 à 6 %. Néanmoins, la résistance à la compression varie considérablement en fonction du dosage de ciment et une limite supérieure économiquement viable est de 8 %. Gooding (1993) indique que la proportion la plus couramment utilisée pour stabiliser les blocs de terre est de 3 à 12 % en poids de ciment.

Selon Heathcote (1994), une teneur minimale en ciment de 0,75% est suffisante pour obtenir une résistance satisfaisante. Cependant, cette étude contredit les résultats d'autres chercheurs qui recommandent un dosage de ciment compris entre 5% et 12%. Par exemple, Walker (1995) souligne que les blocs de construction contenant moins de 5% de ciment sont souvent trop fragiles pour être manipulés en toute sécurité. Plus tard, Walker (1996) a établi que la proportion d'argile dans le sol doit être comprise entre 5% et 20%, celle de ciment entre 4% et 10%, et l'indice de plasticité du sol entre 2,5 et 30%.

1.9.5.4 Effets sur les propriétés du matériau stabilisé

A. Effet sur la densité

Les résultats de la recherche menée par Kerali (2001) et présentés dans la figure 19, ont montré que l'ajout de ciment au mélange de sol améliore la densité sèche des blocs de terre comprimée (BTC). Néanmoins, l'impact de l'ajout de ciment est plus significatif avec une augmentation de la pression de compactage.

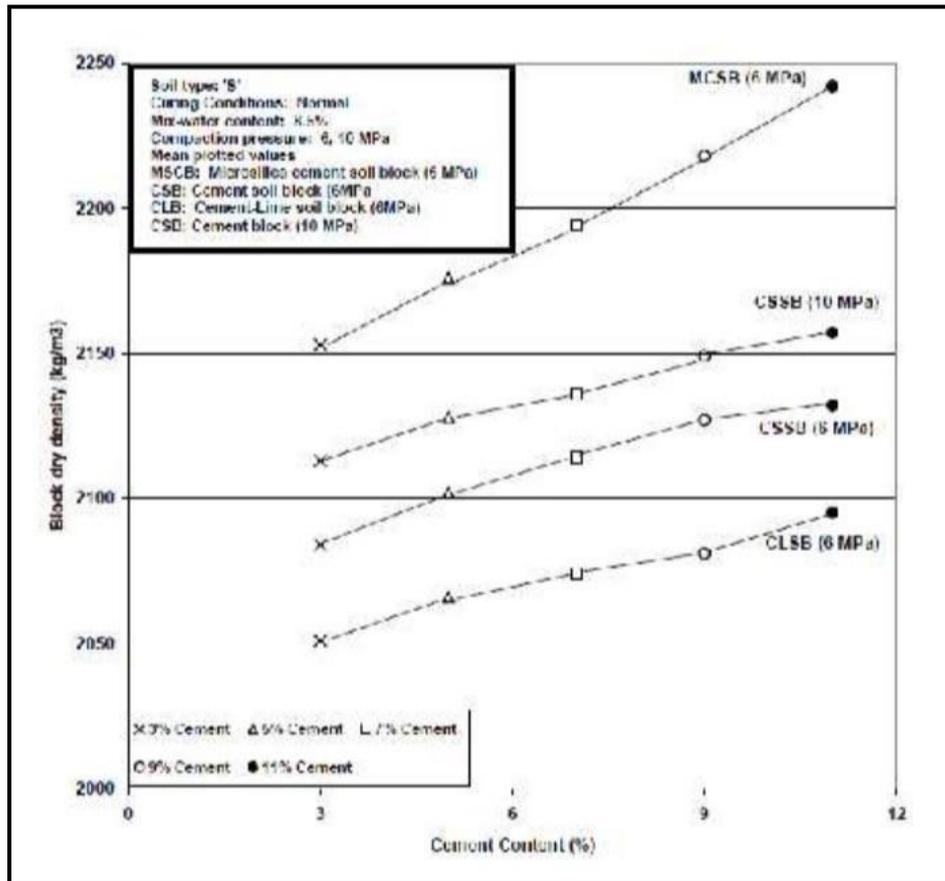


Figure 19 Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée (Kerali, 2001).

B. Effet sur la résistance mécanique

Selon les études d'Akpokodje (1985) et de Walker (1995), l'ajout de ciment au sol améliore significativement sa résistance à la compression. Bahar et al. (2004) ont également constaté que la résistance à la compression et à la traction par fendage augmente en fonction de la quantité de ciment ajoutée au sol (voir figure 20).

Les recherches menées par Akpokodje (1985), Croft (1968) et Walker (1995) ont montré que l'ajout de ciment au sol améliore significativement sa résistance à la compression. Akpokodje (1985) a étudié l'effet de différents teneurs en ciment sur la résistance du sol et a constaté que la résistance à la compression augmente linéairement avec la quantité de ciment.

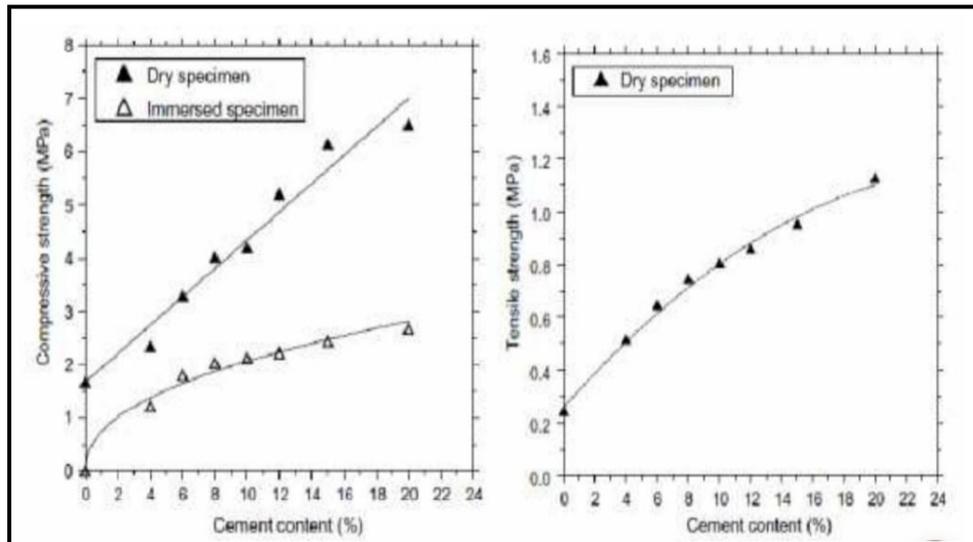


Figure 20 Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004)

La figure 21 présente les résultats de cette étude pour trois types de sols : un loam argileux, un loam sableux et un loam limoneux. Les valeurs de résistance à la compression à 7 jours pour le loam sableux sont les plus élevées, atteignant 1,3 et 2,7 MPa pour 2% et 6% de ciment respectivement. La figure 21 montre également que la résistance du loam sableux augmente plus rapidement avec la quantité de ciment que celles du loam argileux et du loam limoneux.

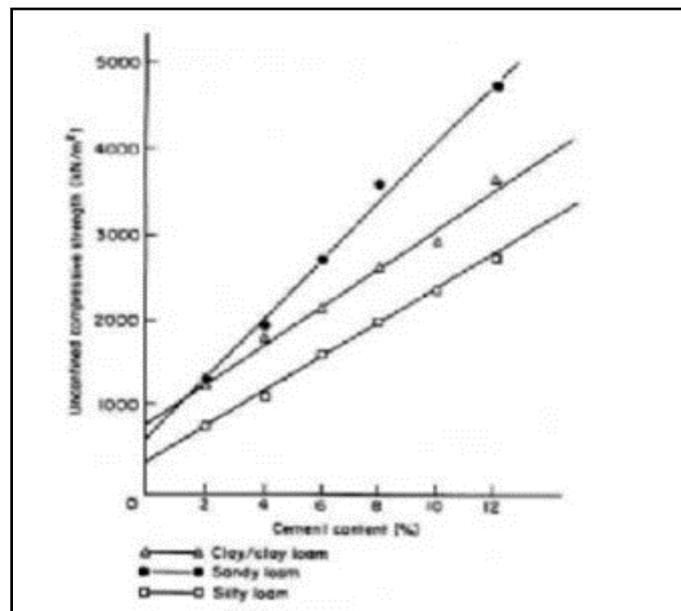


Figure 21 Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne (Akpokodje, 1985).

Doat (1979) et Akpokodje (1985) ont noté que l'augmentation de la résistance à la compression en raison de la stabilisation au ciment peut varier en fonction du type de sol traité. L'avantage principal de la stabilisation au ciment est l'amélioration de la résistance du matériau

à l'eau. Les résultats de la stabilisation peuvent être très satisfaisants si elle est effectuée correctement. Une étude menée par Venkatrama et al. (2005) a montré que la résistance à la compression et à la traction des blocs de terre stabilisés au ciment augmente avec l'augmentation de la quantité de ciment ajoutée. En outre, la résistance à la compression en milieu humide a augmenté de 2,3 fois en doublant la quantité de ciment, comme le montre la figure 22.

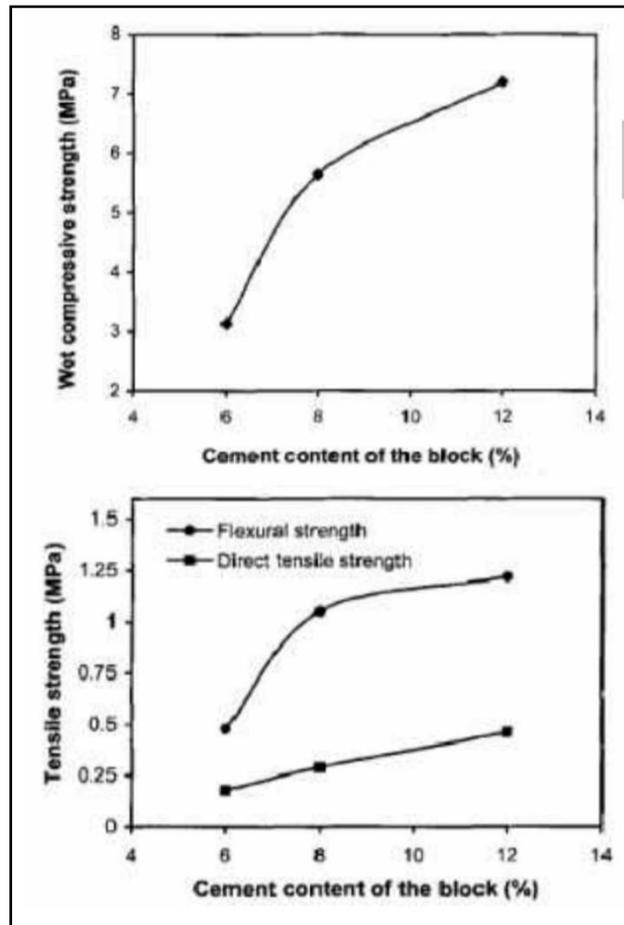


Figure 22 Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment (Venkatrama,2005).

C. Effet sur l'absorption totale

D'après l'enquête menée par Meukam (2004), l'incorporation de ciment présente un impact avantageux sur la capacité d'absorption d'eau des blocs de terre stabilisée. La variation du pourcentage d'absorption d'eau au fil du temps pour diverses quantités de ciment ajoutée est présentée dans la figure 23. L'étude a démontré que l'augmentation de la quantité de ciment ajoutée conduit à une diminution du pourcentage d'absorption d'eau.

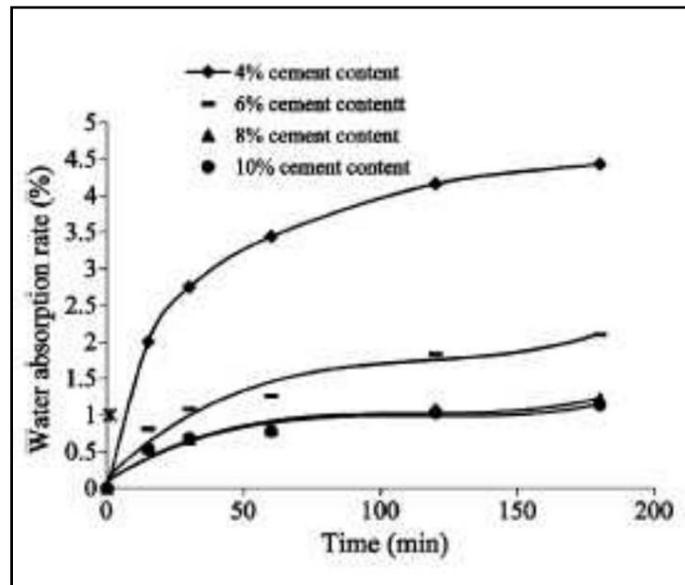


Figure 23 Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment (Meukam, 2004).

1.9.6 Stabilisation à la chaux

1.9.6.1 Généralités

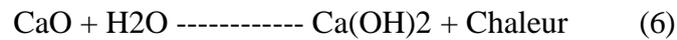
L'utilisation de la chaux en tant que stabilisant des sols remonte à des temps anciens. En effet, les Romains et d'autres civilisations anciennes l'utilisaient pour stabiliser les chaussées (Jarrige, 1989). Depuis, la chaux est devenue un matériau de construction largement utilisé dans de nombreux pays pour la stabilisation des sols. Au fil du temps, des recherches ont été menées pour mieux comprendre les mécanismes de stabilisation de la chaux et pour identifier les conditions d'application les plus appropriées. Ces études ont permis d'améliorer la qualité et la durabilité des structures de sols stabilisées à la chaux, ce qui en fait une technique de construction populaire encore de nos jours.

La chaux est une substance blanche et poudreuse, produite par la décomposition thermique du calcaire. Elle est composée chimiquement d'oxyde de calcium et d'oxyde de magnésium en quantités variables. Toutefois, la dénomination courante de la chaux peut englober différents états chimiques du produit. Dans le domaine de la construction, ils sont distingués selon leurs utilisations :

- La chaux vive est le résultat direct de la calcination du calcaire, principalement composée d'oxyde de calcium (CaO).



- La chaux aérienne, également appelée chaux éteinte, est produite par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). Elle est qualifiée "aérienne" car elle réagit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air.



- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle est obtenue à partir de calcaires argileux. Elle est nommée "hydraulique" car elle durcit en présence d'eau.

Bien que tous les types de chaux puissent être utilisés, les chaux aériennes sont préférables aux chaux hydrauliques [6], L'utilisation de chaux est particulièrement recommandée pour les sols avec une teneur en argile supérieure à 20 %, ainsi que pour les sols ayant un indice des plasticités supérieur à 17 et une limite de liquidité supérieure à 40 % [6].

Il est vivement recommandé d'utiliser de la chaux éteinte plutôt que de la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : elle est difficile à conserver à l'abri de l'humidité avant son utilisation et sa manipulation est pénible lors des mélanges (Le Roux, 1969 ; Gresillon, 1976). Selon les recherches de Le Roux (1987), pour les sols riches en kaolinite, la résistance du sol augmente avec la teneur en chaux pendant une période allant de 2 à 90 jours. Toutefois, pour les sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux est observé à moyen et long terme.

CHAPITRE II
Généralité sur les fibres

2.1. Introduction

Depuis l'Antiquité, l'homme a créé des matériaux composites en combinant différentes matières pour obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques. Les matériaux naturels, tels que les os et le bois, ont fourni des modèles pour ces composites. La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940, a connu un développement constant en raison de ses propriétés mécaniques associées à une faible densité. Ces matériaux ont de nombreuses applications dans des domaines tels que l'industrie aérospatiale, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration, etc. Cependant, leur développement a été entravé par des contraintes liées à l'environnement, à l'hygiène et à la sécurité. Les matériaux composites classiques à armature de fibres de verre, d'aramide ou de carbone posent un problème environnemental important en fin de vie, ce qui a conduit à l'utilisation de fibres naturelles issues de ressources renouvelables et biodégradables. Les fibres naturelles ont également une densité plus faible et sont moins irritantes pour la peau et le système respiratoire. Cependant, elles ont tendance à absorber beaucoup d'eau et ont une faible résistance à la chaleur, ce qui limite leur utilisation dans certaines applications.

2.2. Les fibres

2.2.1. Définition

Les fibres constituent une famille de matériaux qui ont été introduits sur le marché pour de nouvelles applications. Elles sont caractérisées par une longueur d'au moins trois fois leur diamètre et peuvent être classées en fonction de leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), de leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), de leur dimension (macro ou microfibrilles) et de leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour choisir les fibres à utiliser dans une application donnée, il est important de considérer la compatibilité de la fibre avec la matrice et le mode de performance du composite.

2.2.2. Différents types de fibres

Dans le domaine de la construction, plusieurs types de fibres sont utilisés, et elles peuvent être classées par famille :

A. Les fibres naturelles

Elles peuvent être subdivisées en trois grandes catégories selon leur origine (voir figure 24) (Baley, 2013) :

- *Les fibres végétales* : l'utilisation de fibres naturelles, en particulier de fibres végétales, comme renfort de matériaux composites présente deux avantages principaux. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût, et leur utilisation en construction crée de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. De plus, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels, car ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et peu énergivores à produire.

Les fibres végétales comprennent plusieurs types, notamment :

- Les fibres provenant des poils séminaux de graines, telles que le coton et le kapok.
- Les fibres libériennes qui sont extraites des tiges de plantes, comme le lin, le chanvre, le jute et l'ortie.
- Les fibres extraites de feuilles, comme le sisal, de troncs, comme le palmier, et d'enveloppes de fruits, comme la noix de coco.

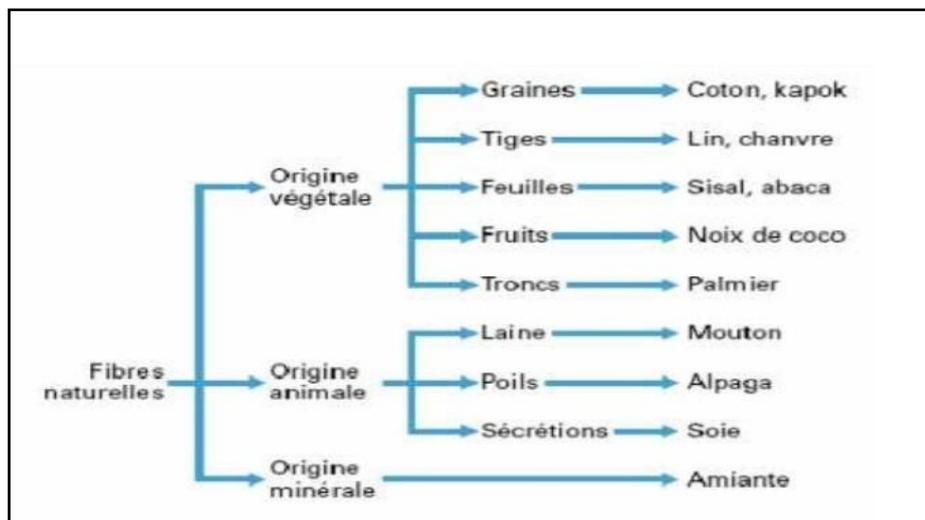


Figure 24 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013).

- *Les fibres animales* : La fibre de laine est la plus importante et la plus couramment utilisée parmi les fibres animales. Elle est reconnue pour ses propriétés isolantes thermiques, sa grande capacité d'absorption (16-18%) et son importante élasticité (45%) (Feughelman, 1997). Les fibres animales peuvent être classées en fonction de leur origine, avec principalement :

- Les poils : laine (provenant de la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire,
- Les sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée, ...
- *Les fibres minérales* : L'amiante est une fibre minérale naturelle qui a suscité l'intérêt des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques, ainsi que pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction, mais a finalement été interdite progressivement en raison de ses risques cancérigènes (Service, 2004).

B. Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont issues de la transformation de polymères synthétiques obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont vu le jour au début du XXe siècle, suite au succès de la fibre de Viscose, et depuis lors, de nombreuses fibres synthétiques ont été développées, chacune possédant des propriétés répondant à des besoins spécifiques. Comme les fibres artificielles, ces fibres sont obtenues par filage. Elles sont très attractives pour de nombreux industriels en raison de leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des conditions saisonnières, ainsi que la possibilité de modifier leurs propriétés selon les besoins. Cependant, elles sont critiquées pour leur impact sur l'environnement, que ce soit pendant leur fabrication ou après leur utilisation, ainsi que pour les difficultés de leur recyclage.

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées comprennent les polyamides (Nylons), les polyesters, les dérivés polyvinyliques et les polyoléfines telles que les polyéthylènes et les polypropylènes, qui connaissent une croissance importante et représentent désormais environ 8 % de toutes les fibres synthétiques produites (Quinn, 2002).

C. Les fibres artificielles

Les fibres artificielles, comprenant des fibres de verre, des fibres de carbone, des fibres d'acier et d'autres, sont les plus largement utilisées dans l'industrie en général et dans le domaine du génie civil en particulier. Ces fibres sont obtenues par filage et ont des propriétés telles que la résistance à la traction, la résistance à la corrosion, la légèreté et la durabilité, ce qui les rend très utiles dans la construction. Les fibres de verre, en particulier, sont couramment utilisées dans les produits composites tels que les réservoirs, les panneaux isolants, les conduites et les ponts. Les fibres de carbone sont également utilisées dans les applications de renforcement

structurel, tandis que les fibres d'acier sont souvent ajoutées au béton pour améliorer sa résistance à la flexion et à la traction.

2.3. Les fibres végétales

2.3.1 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont constituées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, qui forment des structures fibrillaires dans la plante. La quantité d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipides et de matières minérales est relativement faible en comparaison. Les proportions de ces constituants varient considérablement en fonction de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [26].

2.3.2 Classification des fibres végétales

Il est possible de différencier les fibres selon plusieurs critères, notamment :

- Selon l'organe de la plante dont elles sont issues, on peut classer les fibres végétales en fibres de tiges (comme le kénaf, le jute, le lin, la ramie) et en fibres de feuilles (comme le sisal, l'abaca et la paille de graminées) [27].
- Les fibres peuvent également être différenciées selon leur teneur en cellulose, hémicellulose et lignine. Ainsi, on peut distinguer les fibres ligneuses, qui sont dures et rigides, et qui proviennent de matériaux ligneux tels que le bois d'œuvre et les résidus de l'industrie du bois, des fibres non-ligneuses, qui sont douces et souples. Ces dernières proviennent souvent de végétaux non-ligneux, souvent annuels, et sont relativement moins riches en lignine, telles que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin [26].
- Les fibres végétales peuvent également être différenciées en fonction de leur longueur, qui permet de les regrouper en deux catégories : les fibres longues, appelées également libériennes, qui proviennent des tiges et de l'écorce de tiges de plantes annuelles, et qui sont douces. Les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbres sont quant à elles plus dures et plus rigides en raison de leur richesse en lignine [27].

2.3.3 Différentes fibres végétales

L'utilisation de fibres végétales comme renfort dans les matériaux de construction est en constante augmentation. Ces fibres sont une source renouvelable, biodégradable par nature et possèdent de nombreuses qualités mécaniques et hydriques. Les fibres les plus couramment utilisées sont celles provenant de plantes libériennes telles que le Kénaf, le jute, la ramie, le palmier et surtout le chanvre et le lin [27].

2.3.3.1 L'abaca

L'abaca, également connu sous le nom de chanvre de Manille, est une plante de la famille des Musacées qui pousse aux Philippines. Les fibres situées dans les gaines foliaires forment un pseudotrunc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, ainsi que pour la confection de rabanes, de nappes, de stores et de vêtements [28].



Figure 25 Fibre de l'abaca

2.3.3.2 Le lin

Le lin est une plante annuelle qui croît dans de nombreuses régions du monde, tant en Asie qu'en Europe. La fibre de lin est obtenue à partir des tiges de la plante et de l'huile extraite de ses graines (voir figure 2.3). Cette fibre se distingue par sa longueur moyenne élevée, qui atteint en moyenne 25 mm, ainsi que par sa grande résistance. Le lin peut être utilisé en substitution du coton et est fréquemment employé dans la production de papiers fins tels que les papiers à cigarettes ou les papiers bibliques.



Figure 26 Fibre de lin

Les fibres de lin sont polyvalentes et peuvent être utilisées pour la fabrication de cordes, de tissus, et plus récemment, de matériaux isolants pour la construction. Les graines de lin sont utilisées pour produire de l'huile de lin, qui est utilisée dans l'industrie de l'encre et de la peinture, ainsi que pour la consommation humaine et animale en raison de sa teneur en oméga-3. Le lin est l'une des rares fibres textiles végétales d'origine européenne, avec la particularité d'avoir une longueur élevée de plusieurs dizaines de centimètres, par rapport aux fibres courtes (coton, chanvre) ou moyennes (laine).

2.3.3.3 Le chanvre

Le chanvre est une fibre végétale de la même famille que le lin, le Kéna, le jute et la ramie. Toutes ces plantes présentent des fibres externes longues et étroites ainsi que des fibres internes ligneuses (voir figure 27). La fibre de chanvre possède des propriétés techniques qui répondent aux besoins textiles traditionnels, tout en ouvrant la voie à de nombreuses innovations. Cette plante est cultivée dans les pays à climat tempéré, notamment en Europe de l'Est, en France et en Italie. La France est le premier producteur européen de chanvre. Les fibres de chanvre sont principalement utilisées pour la production de textiles tels que des tapis et des vêtements, ainsi que pour la fabrication de produits industriels tels que des géotextiles, des toiles anti-érosion, des renforts composites et des charges de remplissage. En raison de sa grande résistance et de son intérêt économique, le chanvre est principalement utilisé dans les domaines des composites et du papier, où ses caractéristiques physiques lui confèrent une grande force et une excellente rentabilité.



Figure 27 Fibre de chanvre

Le chanvre a une origine asiatique, mais il était déjà cultivé en Chine il y a environ 5000 ans. Pendant plusieurs siècles, sa culture a prospéré dans le bassin méditerranéen. Les usages traditionnels du chanvre incluent la fabrication de toiles de maison, de cordages maritimes et de vêtements. Plus tard, cette plante a également été utilisée pour produire du papier.

2.3.3.4 Le coton

Le cotonnier, une plante annuelle mesurant environ 1 à 1,50 m de haut (Fig. 28), est cultivé dans des régions chaudes telles que l'Amérique, l'Afrique, l'Asie et même l'Europe (en Espagne). Les fibres de coton, appelées linters, sont obtenues à partir des graines et sont appréciées pour leurs bonnes caractéristiques physiques et mécaniques. Elles sont souvent utilisées pour la fabrication de papiers de qualité supérieure et sont également très demandées pour la production de billets de banque et de papiers fiduciaires, en raison de leur capacité à résister au pliage.



Figure 28 Fibre de coton

2.3.3.5 Le kénaf

Le Kénaf est une plante herbacée qui peut atteindre jusqu'à 3 m de hauteur et qui pousse principalement dans les régions tropicales ainsi qu'en Amérique du Sud. Cette plante est cultivée exclusivement pour la production de papier. La longueur moyenne des fibres qu'elle produit est de 1,5 mm, ce qui la situe entre les fibres des feuillus et des résineux (Fig. 29).



Figure 29 Le kénaf

Le Kénaf est connu sous de nombreux noms différents dans le monde, tels que chanvre de Deccan, chanvre de Bombay, chanvre de Guinée ou Pokaeo. Cette plante ne peut pas survivre à des températures de gel et se développe donc principalement dans les régions tropicales et subtropicales. Bien qu'elle soit originaire d'Afrique, elle est également cultivée en Asie et en Amérique du Sud dans des zones où les conditions climatiques sont favorables.

2.3.3.6 Le jute

Le jute est une plante arbustive qui trouve son origine dans le sud-est asiatique et est principalement cultivée en Inde et au Bangladesh. Les fibres utilisées dans l'industrie papetière proviennent des déchets issus de la culture et de la filature de la plante. Les fibres ont une longueur moyenne de 2 mm et une largeur de 20 μm . Les propriétés de ces fibres sont souvent comparables à celles du kénaf (Fig. 30)



Figure 30 Fibre de jute

Le jute est une plante dont les fibres sont fortement lignifiées, ce qui les rend robustes et résistantes. Ces fibres sont couramment utilisées pour la fabrication de sacs solides destinés au transport de charbon ou de pommes de terre. Elles sont également utilisées dans la fabrication de semelles d'espadrilles pour leur résistance et leur durabilité.

2.3.3.7 Le sisal

Le sisal est une plante vivace qui se compose d'une rosette de grandes feuilles triangulaires pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres de long (Figure 31). Cette plante est originaire des régions tropicales et est principalement cultivée en Amérique du Sud et en Afrique. Les fibres obtenues à partir de cette plante ont une longueur moyenne d'environ 3mm.



Figure 31 Fibre de sisal

2.3.3.8 La ramie

La ramie est une plante arbustive qui a ses origines en Asie de l'Est et qui est principalement cultivée en Chine, au Japon et en Amérique. Les fibres de la ramie ont une longueur moyenne de 40 à 250 mm et un diamètre moyen de 45 μm . Bien que ces fibres ressemblent à celles du lin, elles sont encore plus longues, plus solides et plus rigides. La figure (32) illustre un exemple de fibre de ramie.



Figure 32 Fibre de ramie

Les tiges de la ramie, également appelée "ortie de Chine" (*Boehmerianivea* (L.) Gandisch, *Urticaceae*), fournissent des fibres de cellulose presque pures d'excellente qualité. Ces fibres sont largement utilisées pour la fabrication de tissus et de papiers résistants. Les fibres sont remarquablement longues (50 à 250 mm), très solides (elles ne peuvent pas être cassées à la main), imputrescibles et brillantes, ce qui leur confère une apparence soyeuse. En conséquence, les tissus fabriqués à partir de ces fibres ont été surnommés "soie végétale".

2.3.3.9 Le coco

Les fibres de coco sont obtenues à partir de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Avant d'être filées et tissées, ces fibres sont assouplies dans l'eau (Figure 33). En raison de son filage grossier et irrégulier, le coco présente une apparence rustique. De plus, il est très résistant, isolant, imputrescible et antibactérien, ce qui le rend idéal pour une utilisation dans des pièces spacieuses ou pour mettre en valeur un aspect rustique.



Figure 33 Fibre de coco

2.3.3.10 L'alfa

L'alfa, également connue sous le nom de spart (*Stipa tenacissima* L.), est une plante herbacée de la famille des graminées, originaire d'Afrique du Nord et d'Espagne. Cette plante est utilisée pour produire une variété d'articles tels que des cordages, des espadrilles, des tissus grossiers, du papier, des tapis et des paniers. Le processus de fabrication d'objets à partir de fibres végétales est généralement appelé la "sarterie".



Figure 34 L'alfa

2.3.3.11 Palmier dattier

Le palmier dattier est principalement constitué de 10 parties : les palmes, la jeune pousse, le régime de dattes, les dattes, le gourmand, le stipe, les cicatrices annulaires, le rejet, le bulbe et les racines. La fibre de palmier dattier est illustrée sur la figure (35).



Figure 35 Fibre de palmier dattier

CHAPITRE III
Matériaux et méthodes d'essais

3.1 Introduction

Il est généralement courant d'utiliser des sols dans tous les travaux de génie civil. Selon leur nature, ils peuvent être employés soit pour la construction d'ouvrages en terre (couches de chaussées, barrages, digues, barrières étanches, etc.), soit comme support de fondations pour divers ouvrages (bâtiments, ponts, etc.).

3.2. Mode opératoire

1. Préparation du mélange : Rassemblez les matériaux nécessaires pour le mélange de terre comprimée, tels que de la terre, du sable, de l'argile et éventuellement des additifs. Expérimentez différentes proportions et compositions pour trouver la combinaison optimale.



Figure 36 Préparation du mélange

2. Mélange des ingrédients : Mélangez soigneusement les ingrédients secs dans des proportions définies. Vous pouvez utiliser un mélangeur ou le faire manuellement en utilisant des pelles ou des outils similaires.



Figure 37 Mélange des ingrédients

3. Ajout d'eau : Graduellement, ajoutez de l'eau au mélange sec tout en continuant à le mélanger. Veillez à obtenir une consistance appropriée qui permettra une bonne cohésion du mélange sans qu'il soit trop humide ou trop sec.



Figure 38 Mélange avec l'eau

4. Remplissage du moule : Remplissez le moule de presse hydraulique avec le mélange de terre humide préparé. Assurez-vous de bien tasser le matériau dans le moule pour éliminer les vides d'air et obtenir une densité uniforme.



Figure 39 Moule

5. Compression : Une fois le moule rempli, placez-le dans la presse hydraulique. Appliquez une pression progressive sur le matériau en utilisant la presse hydraulique. La pression spécifique dépendra des caractéristiques du mélange et des propriétés souhaitées de la brique. Veillez à respecter les limites de pression recommandées pour éviter d'endommager le moule ou la presse.

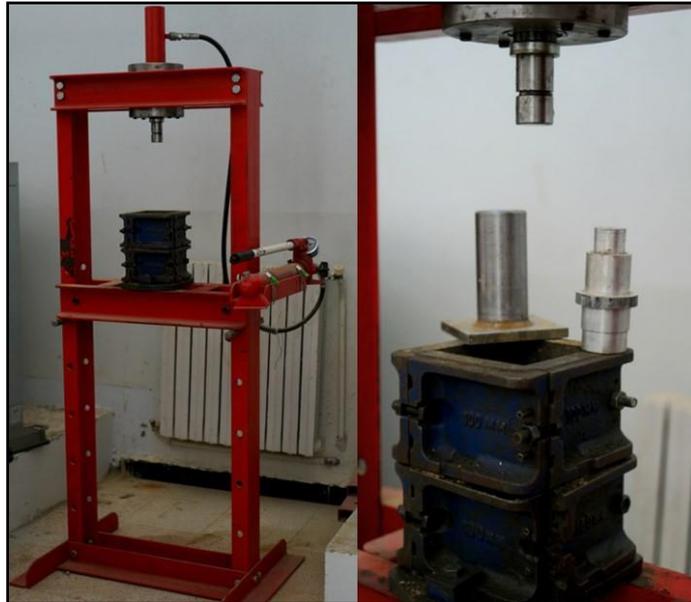


Figure 40 La presse hydraulique

6. Démoulage : Après avoir appliqué la pression nécessaire, retirez le moule de la presse hydraulique. Manipulez le moule avec précaution pour éviter d'endommager la brique nouvellement comprimée.



Figure 41 Démoulage

7. Séchage et durcissement : Placez les briques moulées dans un endroit sec et bien ventilé pour permettre le séchage et le durcissement. Cela peut prendre plusieurs jours ou semaines, en fonction des conditions environnementales. Assurez-vous de retourner régulièrement les briques pour un séchage uniforme.



Figure 42 Séchage et durcissement

3.3 Caractéristiques mécaniques

Des briques en béton de (Cendre du bois, fibre de bois) communément appelées BTC, et des éprouvettes, sont produites à partir de matériaux locaux et en utilisant

différentes formulations. Les informations détaillées sur ces formulations sont fournies ci-dessous.

3.3.1 Essai Proctor

Il y a deux types d'essais Proctor : l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié. Les deux essais sont basés sur le même principe, à l'exception des paramètres liés à l'énergie de compactage appliquée, tels que la masse de compactage, le nombre de couches, etc.

Le choix de l'intensité de compactage dépend de la surcharge que l'ouvrage subira pendant sa durée de vie :

- L'essai Proctor normal convient pour des résistances relativement faibles, telles que pour un remblai peu ou pas chargé.
- L'essai Proctor modifié est utilisé pour des résistances plus élevées, comme pour une chaussée d'autoroute.

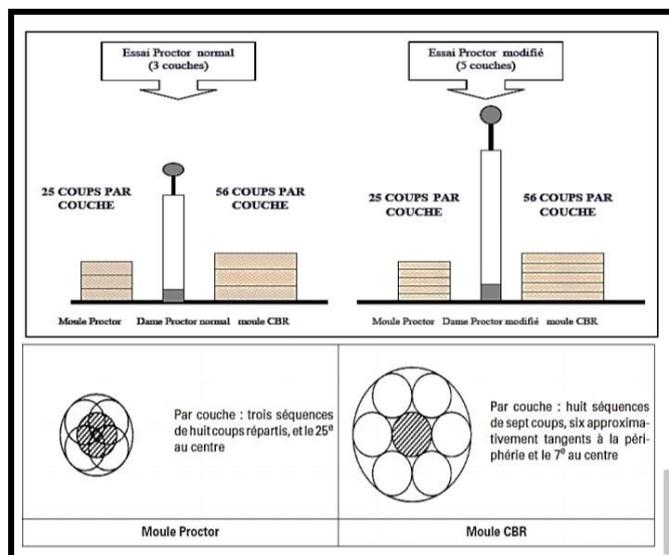


Figure 36 Exécution des essais Proctor normal et modifié.

3.3.1.1 Essai Proctor normale (NF P 94 – 093)

3.3.1.1.1 But de l'essai

L'objectif de l'essai Proctor est de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage spécifiques, afin d'obtenir le meilleur compactage possible ou encore la capacité portante maximale (Boudlal, 2007).

3.3.1.1.2 Principe de l'essai

Pour réaliser l'essai Proctor, on prélève des échantillons de sol qu'on fait sécher à l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures. Ensuite, on prépare généralement six quantités de sol de masses équivalentes à partir de ces échantillons, auxquelles on ajoute progressivement un certain pourcentage d'eau, avec un intervalle identique pour chaque couche à compacter. Ensuite, on procède au compactage par couche successive dans un moule Proctor, en suivant une méthodologie précise. À la fin de l'essai, on obtient une teneur en eau optimale (W_{opt}) qui correspond à une densité maximale (ρ).

3.3.1.1.3 Matériel utilisé

- * Règle à raser
- * Balance
- * Etuve
- * Eau et éprouvette graduée
- * Dame Proctor
- * Moule Proctor



Figure 44 Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal.

3.3.1.1.2 Expression des résultats

Il est nécessaire de réaliser les calculs suivants pour chaque échantillon compacté :

- * Détermination de la teneur en eau ;
- * Calcul de la masse de matériau sec présente dans le moule ;
- * Estimation de la masse volumique du matériau sec en prenant en compte le volume réel du moule utilisé, en utilisant les coordonnées suivantes :

$$\rho_d = \frac{M}{(1 + w) V}$$

Tableau 2 Résultats d'essai Proctor

	10 %		12%		14%		16%	
Moule vide	3321 g		3321 g		3316 g		3316 g	
Volume moule	934.43 cm ³							
Moule +sol humide	4732 g		4779 g		5000 g		4977 g	
Eau	200 ml		240 ml		280 ml		320 ml	
&h	15.10 KN/m ³		15.60 KN/m ³		18.02 KN/m ³		17.77 KN/m ³	
Numéro de tare	5	6	7	8	9	10	11	12
Mass tare vide	18.123	22.248	22.153	21.606	22.577	22.167	22.248	22.150
Mass total humide	99.922	99.865	91.922	87.811	94.308	92.662	87.636	83.363
Mass total sec	93.111	92.569	84.978	80.846	85.661	84.730	78.970	75.840
W (%)	9.08	10.37	11.05	11.76	13.71	12.68	15.28	14.01
W (%) calculé	9.73		11.41		13.20		14.68	
γd	13.761		14.002		15.912		15.495	

Tableau 3 Mélange avec le pourcentage de ciment et cendre de bois

	Ciment	Cendre
1	0	0
2	10	0
3	0	10
4	10	10
5	0	5
6	10	5
7	0	5
8	10	5
9	5	0
10	5	10
11	5	0
12	5	10

3.3.2 La résistance mécanique

Les essais de compression simple sont réalisés à 7 et 28 jours en écrasant des échantillons de BTC cubiques de dimensions 10x10x10 cm³ à l'aide d'une presse.



Figure 45 Essai de compression

CHAPITRE IV Résultats et discussion

4.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la présentation des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de notre mémoire. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet du ciment sur la résistance d'un BTC. Nous avons réalisé une série d'expériences rigoureuses et systématiques pour explorer cette relation et obtenir des données quantitatives fiables.

Dans un premier temps, nous examinerons en détail les procédures expérimentales mises en place pour garantir la précision et la reproductibilité des résultats. Nous présenterons les différentes étapes, depuis la préparation des échantillons jusqu'à la réalisation des essais de compression. Une attention particulière sera portée aux variables contrôlées et aux méthodes utilisées pour garantir la fiabilité des mesures.

Ensuite, nous procéderons à l'analyse des résultats obtenus. Nous discuterons des variations observées dans la résistance à la compression en fonction de différentes concentrations de ciment, de cendre de bois et de fibre de bois. Des graphiques et des figures seront présentés pour illustrer visuellement les tendances et les relations entre les variables étudiées. De plus, nous introduirons un modèle mathématique développé pour quantifier l'effet de ces facteurs sur la résistance du matériau.

4.2 Corrélation entre les valeurs du model et de l'expérimentales

La Figure 46 illustre la corrélation entre les valeurs expérimentales et celles du modèle de résistance à la compression à 7 jours.

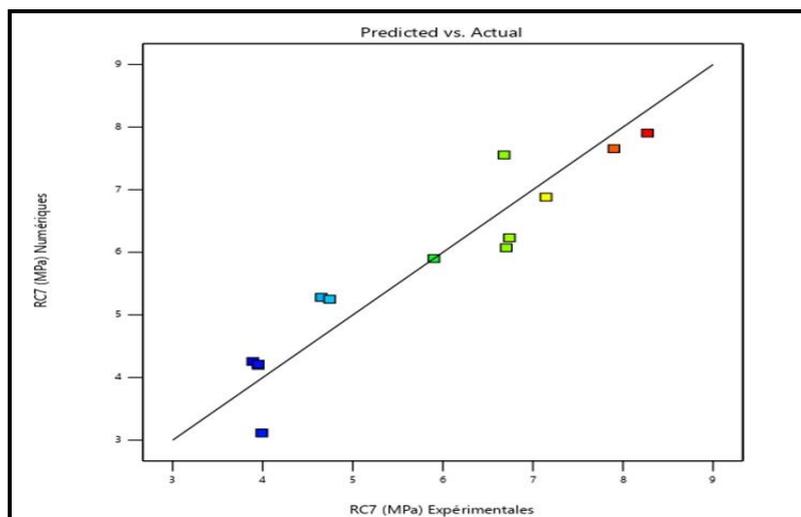


Figure 46 Corrélation entre les valeurs expérimentales et celles du modèle de résistance à la compression à 7 jours.

Lorsqu'un nuage de points entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques de prédiction de la résistance à la compression à 7 jours montre une bonne correspondance, cela indique une prédiction précise et fiable.

Un nuage de points est généralement utilisé pour représenter graphiquement les paires de valeurs expérimentales et prédites. Chaque point représente une paire de valeurs correspondantes. Si les points sont regroupés étroitement autour d'une ligne de tendance ou d'une droite, cela indique que les valeurs prédites sont proches des valeurs expérimentales, ce qui suggère une bonne prédiction.

L'interprétation d'un nuage de points peut également inclure l'évaluation de la distribution des points par rapport à la ligne de tendance. Les points sont répartis de manière homogène de part et d'autre de la ligne de tendance, cela indique une précision globale de la prédiction. Si les points sont concentrés près de la ligne de tendance, cela indique une précision élevée et une faible dispersion des prédictions par rapport aux valeurs expérimentales.

En résumé, un nuage de points montrant une bonne correspondance entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques de prédiction est une indication d'une prédiction précise et fiable.

4.3. Évaluation des effets des facteurs

La Figure 47 présente le degré d'influence de différents facteurs sur la résistance à la Compression.

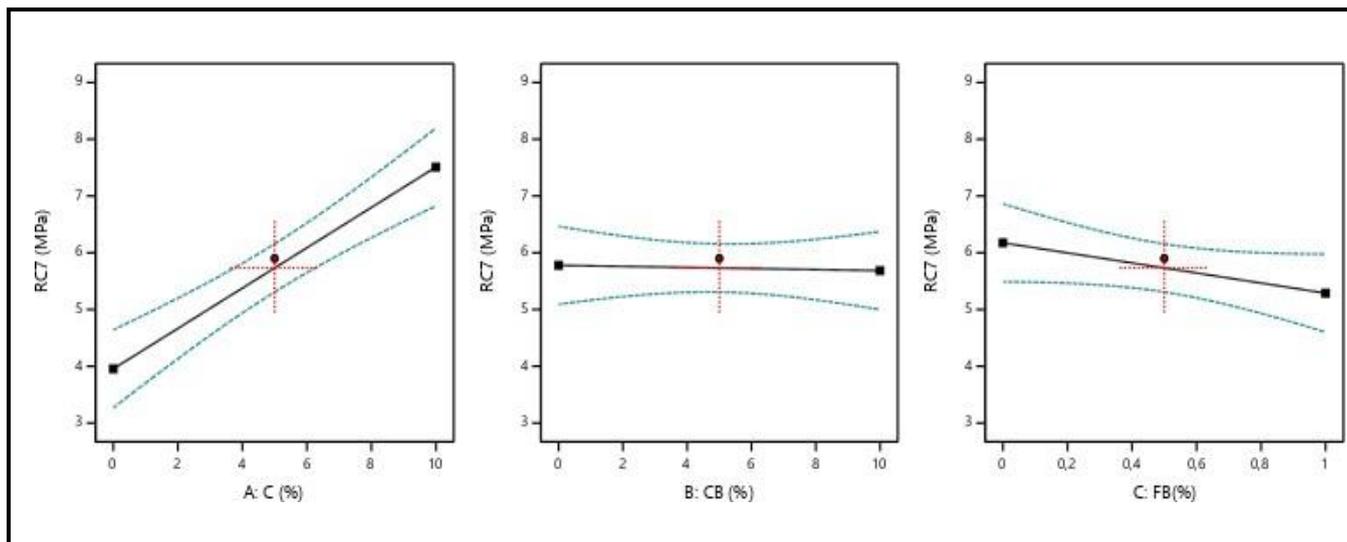


Figure 47 Degré d'influence de différents facteurs sur la résistance à la compression.

L'interprétation des résultats indique que différents facteurs ont un impact sur la résistance des briques de terre comprimée (BTC).

Premièrement, il est constaté que l'augmentation de la teneur en ciment a un effet significatif sur la résistance des briques de terre comprimée. Cela signifie que plus la quantité de ciment utilisée dans la fabrication des briques est élevée, plus la résistance à la compression des briques est grande. Cette relation positive suggère que le ciment joue un rôle clé dans l'amélioration de la résistance des briques de terre comprimée.

Deuxièmement, il est observé que la présence de cendre de bois n'a pas d'effet significatif sur la résistance des briques de terre comprimée. Cela indique que l'ajout de cendre de bois, en tant que matériau supplémentaire dans la fabrication des briques, n'a pas d'influence significative sur leur résistance à la compression. Cependant, il est important de noter que la cendre de bois peut encore avoir d'autres avantages, tels que des propriétés isolantes ou environnementales, même si elle n'a pas d'effet direct sur la résistance.

Troisièmement, il est constaté que l'augmentation du taux de copeaux de bois a un effet négatif sur la résistance à la compression des briques de terre comprimée. Cela signifie que plus la quantité de copeaux de bois utilisée dans la fabrication des briques est élevée, plus la résistance à la compression des briques est réduite. Il est possible que l'ajout de copeaux de bois réduise la cohésion des matériaux de la brique, ce qui entraîne une diminution de la résistance globale.

En conclusion, l'interprétation des résultats met en évidence l'importance de la teneur en ciment dans l'augmentation de la résistance des briques de terre comprimée. En revanche, l'ajout de cendre de bois n'a pas d'effet significatif sur la résistance, et l'augmentation du taux de copeaux de bois a un effet négatif sur la résistance à la compression des briques de terre comprimée. Ces informations sont précieuses pour la conception et l'amélioration des briques de terre comprimée en vue d'obtenir des produits de qualité et de meilleures performances structurelles.

4.4. Loi mathématique

Les variables indépendantes obtenues [C] et [CB] [FB] et la réponse RC7 sont introduites dans le logiciel JMP 16.

Le modèle développé est basé sur une approche de conception factorielle complète. On peut s'attendre à ce que la forme mathématique soit valide pour une large gamme de mélanges.

Bien que le modèle développé soit basé sur un certain ensemble limité de données, ils peuvent être utiles pour comprendre l'influence de chaque terme sur le comportement des BTC.

Les modèles mathématiques proposés pour la prédiction de la réponse RC est le suivant: L'équation suivante représente le modèle mathématique qui lie la résistance à la compression et les trois facteurs influents :

$$\begin{aligned}
 RC7 = & 5.9 + 1.77 \left(\frac{C - 5}{5} \right) - 0.046 \left(\frac{CB - 5}{5} \right) - 0.442 \left(\frac{FB - 0.5}{0.5} \right) - 0.078 \left(\frac{C - 5}{5} \right) \cdot \left(\frac{CB - 5}{5} \right) \\
 & + 0.106 \left(\frac{C - 5}{5} \right) \left(\frac{FB - 0.5}{0.5} \right) + 0.0315 \left(\frac{CB - 5}{5} \right) \left(\frac{FB - 0.5}{0.5} \right) - 0.0827 \left(\frac{C - 5}{5} \right)^2 \\
 & + 0.184 \left(\frac{CB - 5}{5} \right)^2 - 0.376 \left(\frac{FB - 0.5}{0.5} \right)^2
 \end{aligned}$$

Où

RC7 : résistance à la compression à 7 jours

C : le facteur Ciment

CB : Cendre du bois

FB : fibre de bois

4.5. Analyse de la variance

L'analyse de variance (ANOVA) permet d'évaluer la contribution des facteurs d'effet aux réponses (tableau 3). Le modèle utilisé dans ce travail présente des coefficients de

corrélations relativement élevées, atteignant 0,83. Cette valeur témoigne d'une bonne corrélation entre les réponses obtenues expérimentalement et les enregistrements du modèle.

Ainsi, nous pouvons conclure que les modèles établis sont précis pour prédire avec exactitude l'effet du ciment, de la cendre de bois et de la fibre de bois sur le comportement mécanique des briques de terre comprimée (BTC). De plus, les modèles adoptés permettent de tracer les courbes d'iso-réponse en fonction des différents facteurs d'effet.

Par ailleurs, l'analyse de la variance (ANOVA) pour chacune des réponses modélisées est présentée dans le tableau 3. L'importance ou la signification statistique des modèles établis dans la présente étude peut être évaluée à l'aide de la distribution du test de Fisher. En effet, pour un intervalle de confiance à 90 %, le ratio de Fisher s'élève à 19,46, indiquant une valeur significativement élevée. De plus, dans ce contexte, les valeurs de probabilité (Prob.> F) pour tous les modèles étaient inférieures à 5 %, confirmant ainsi l'existence d'au moins un facteur d'effet significatif dans le modèle (la valeur de p confirme qu'il existe au moins un facteur d'effet significatif dans le modèle).

Le tableau 3 met en évidence la contribution de chaque facteur (C) et (CB mass%) (FB mass%) ainsi que leurs interactions sur les réponses étudiées. Le critère $P \leq 0,05$ a été utilisé pour vérifier la significativité de chaque coefficient. Il est notable que les effets des facteurs et de leurs interactions sur les réponses sont très significatifs.

Tableau 4 Evaluation de la contribution des facteurs d'effet

Source	Nombre de coefficients	Degrés de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
C(0,10)	1	1	25,268941	22,4930	0,0178*
CB(0,10)	1	1	0,017485	0,0156	0,9086
FB(0,1)	1	1	1,568221	1,3959	0,3225
C*B	1	1	0,024336	0,0217	0,8923
C*FC	1	1	0,045369	0,0404	0,8536
B*FC	1	1	0,003969	0,0035	0,9563
C*C	1	1	0,015652	0,0139	0,9135
B*B	1	1	0,078017	0,0694	0,8092
FC*FC	1	1	0,324436	0,2888	0,6283

4.6. Surface de réponse

L'analyse de la figure 48 représentant la surface de réponse indique clairement que l'effet du ciment est plus significatif que celui de la cendre de bois en ce qui concerne la résistance à la compression. Lorsque la quantité de ciment augmente, on observe une augmentation notable de la résistance du matériau.

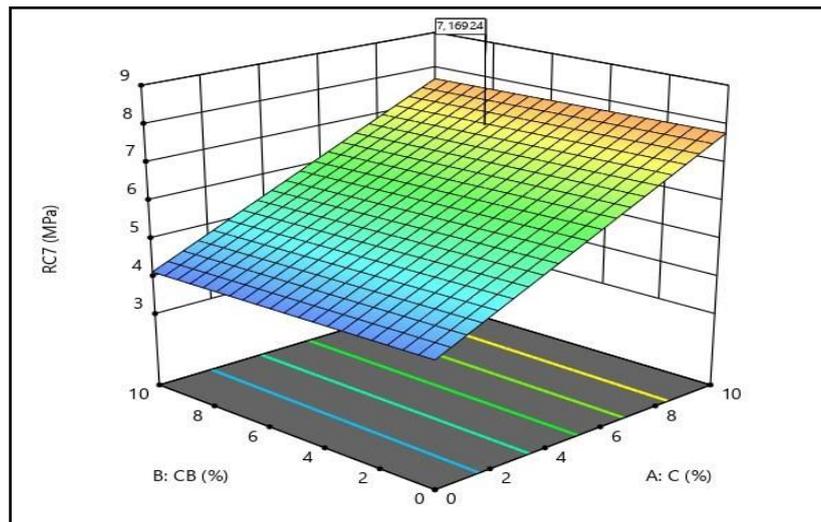


Figure 48 surface de réponse relation entre CB et C.

Cela suggère que le ciment joue un rôle majeur dans l'amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance du matériau. Une augmentation de la quantité de ciment dans le mélange conduit à une résistance accrue à la compression. En revanche, l'effet de la cendre de bois sur la résistance à la compression est négligeable. Cela signifie que l'ajout de cendre de bois n'a qu'un impact minime sur la résistance du matériau étudié.

Ces observations soulignent l'importance du ciment en tant qu'élément clé dans la formulation du matériau, tandis que la cendre de bois peut avoir d'autres avantages ou utilisations, mais elle ne semble pas avoir un effet significatif sur la résistance à la compression.

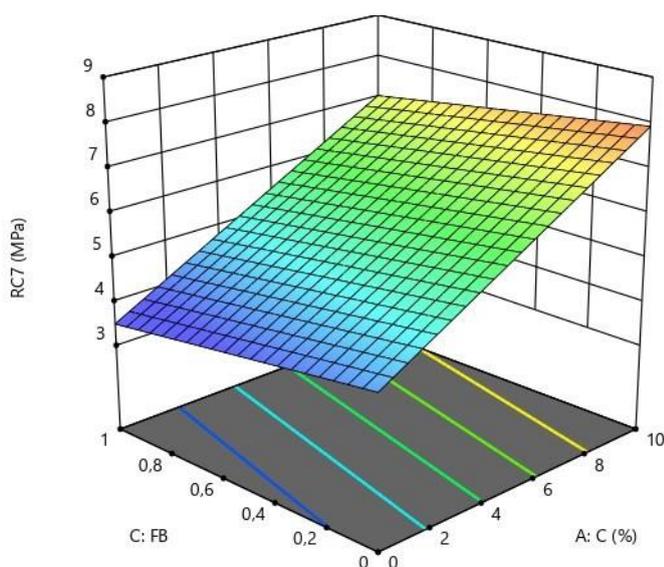


Figure 49 surface de réponse relation entre C et FB

D'après l'analyse de la figure 49 illustrant la surface de réponse, il est clair que l'influence du ciment sur la résistance à la compression est plus marquée que celle de la fibre de bois. Une augmentation de la quantité de ciment entraîne une nette amélioration de la résistance du matériau. Ces résultats suggèrent que le ciment joue un rôle primordial dans l'amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance du matériau. En augmentant la proportion de ciment dans le mélange, la résistance à la compression augmente de manière significative.

En revanche, l'incidence de la fibre de bois sur la résistance à la compression est négligeable. Cela signifie que l'incorporation de fibre de bois a un impact minime sur la résistance du matériau examiné.

Ces observations mettent en évidence l'importance cruciale du ciment en tant qu'élément clé dans la formulation du matériau, tandis que la fibre de bois peut présenter d'autres avantages ou utilisations, mais ne semble pas avoir d'effet significatif sur la résistance à la compression.

4.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les résultats expérimentaux de notre mémoire, mettant en évidence l'effet significatif du ciment sur la résistance du BTC.

L'analyse des données a clairement démontré que l'augmentation de la quantité de ciment dans le mélange entraîne une amélioration notable de la résistance à la compression. De plus, le modèle

mathématique utilisé a confirmé de manière cohérente ces observations, renforçant ainsi leur validité. Ces résultats confirment l'importance capitale du ciment en tant qu'élément clé dans la formulation du matériau, soulignant son rôle majeur dans l'amélioration des propriétés mécaniques. Les implications de ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des mélanges de matériaux et la conception de structures plus résistantes. Dans le prochain chapitre, nous aborderons les perspectives d'application de ces résultats et les potentielles améliorations à apporter à nos expérimentations.

Conclusion générale

Conclusion générale

La brique de terre comprimée avec le copos de bois cendre de bois stabilisé par le ciment est une innovation intéressante dans le domaine de la construction durable. Cette technique combine des matériaux naturels et recyclés pour créer un matériau de construction solide et respectueux de l'environnement.

La brique de terre comprimée, également appelée brique en terre crue, est fabriquée en mélangeant de la terre avec de l'eau et en la compressant dans des moules. Ce matériau est connu depuis des siècles et est apprécié pour son faible impact environnemental, sa durabilité et ses bonnes propriétés thermiques.

L'ajout de copeaux de bois et de cendres de bois stabilisés par le ciment à la brique de terre comprimée offre plusieurs avantages. Les copeaux de bois ajoutent de la légèreté au matériau, ce qui facilite sa manipulation et réduit la quantité de matière première requise. De plus, les copeaux de bois apportent une meilleure isolation thermique et acoustique à la brique, ce qui en fait un matériau idéal pour la construction de maisons écologiques.

Les cendres de bois, quant à elles, peuvent être obtenues à partir de résidus de combustion de biomasse. En les incorporant dans la brique de terre comprimée, elles contribuent à la réutilisation des déchets et à la diminution de l'empreinte carbone de la construction. De plus, les cendres de bois stabilisées par le ciment augmentent la résistance mécanique de la brique, ce qui en fait un matériau plus solide et durable.

En conclusion, la brique de terre comprimée avec le copos de bois cendre de bois stabilisé par le ciment est une alternative écologique et durable aux matériaux de construction traditionnels. Elle offre des avantages tels que la légèreté, l'isolation thermique et acoustique, la réduction des déchets et une empreinte carbone réduite. Cependant, il est important de souligner que chaque projet de construction est unique, et il est essentiel de consulter des experts en ingénierie et en construction pour évaluer l'adéquation de ce matériau dans un contexte spécifique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [2] Houben. H, Guillaud H. Earth construction a comprehensive guide. London : Intermediate Technology; 1994.
- [3] Rigassi V. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerreEAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- [4] Taallah.B. Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibre, vol 202, 2014
- [5] Houben H, Rigassi V, Garnier P. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.
- [6] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [7] Michot A. Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.
- [8] Mme Allam née Boussak Hassina, Mme Chemani Halima. Mémoire de thèse : Effet de la température sur les performances des céramiques contenant la bentonite de Maghnia, vol 175, 2015;
- [9] Le Pluart L. Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite: Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux. Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.
- [10] Benchabane A. Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg I, France, 2006.
- [11] Mckenzie RC. The classification of soil silicates and oxydes. In : Soil components vol. 2; Inorganic components. Gieseking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, pp.1-25, 1975.
- [12] Caillère S, HENIN S. La classification des argiles. XXème congrès Géol. Internat., Mexico, pp. 1-8, 1959.
- [13] Mitchell JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème edition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.
- [14] Lambe TW. The Structure of Inorganic Soil, Proceeding. ASCE, Vol. 79, Separate N°. 315,49p, 1953.

- [15] Grim RE. Physico-Chemical Properties of Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations division. ASCE, vol. 85, no. SM2, pp. 1-17, 1959.
- [16] Saiyouri N. Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées, Thèse doctorat, Ecole Centrale Paris, 228 pp, 1996.
- [17] Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [18] Ausroads. Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998
Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.
- [19] Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology 42, 223-237, 1996.
- [20] Bell FG. Methods of treatment of unstable ground. Newnes-Butterworth, London, 1975.
- [21] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. Soft Ground Improvement in lowland and other Environments. ASCE Press. New York, 1996.
- [22] Centre pour le développement de l'entreprise (CDE). Blocs de terre comprimée: procédures d'essais. Série technologies n°16. CDE, CRATERRE-EAG, ENTPE, p. 121, 1982.
- [23] Croft JB. The problem in predicting the suitability of soils for cementitious stabilization. Engineering Geology, Vol. 2(6), 397-424, 1968.
- [24] DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, Swan JB. Soil Compaction: Causes, Effects and Control. University of Minnesota Extension Service. 2001.
- [25] Walker P. and Stace T. Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and
Walker, P. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil
Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.
- [25] Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.
- [26] Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. Courier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [27] Heathcote, K, and Piper R. Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. J. Proc. Roy. Soc. New South Wales, vol. 127, pp. 33-37, 1994.
- [29] United Nations. Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992

- [30] Jarrige JF. Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgrah,
- [31] F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [32] Zapata Massot Céline, « synthèse de matériaux composite par Co-broyage en voie sèche et caractérisation des propriétés physico-chimique et d'usage des matériaux », institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2004.
- [33] <http://www.ac-nice.fr/>
- [34] USACE. Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways
- [35] Moszkowicz P, Barna R. Stabilisation - solidification des déchets. Techniques de L'ingénieur, Article G 2 080, Volume G. 04 . 2001.