

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° : .....



DOMAINE : GENIE CIVIL  
FILIERE : GENIE CIVIL  
OPTION : MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: Mekkaoui Hanane**

**Intitulé**

**Caractérisation Mécanique de la Brique de  
Terre Comprimée et Stabilisée(BTCS) sous  
l'effet des efforts de Compression et de  
Flexion.**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Pr. Nasri A/Ghani	Université M'sila	Président
Pr. Bencheikh Mohamed	Université M'sila	Rapporteur
Dr. Siline Mohamed	Université M'sila	Examineur
Dr. Maza Mekki	Université M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2018/2019**



## REMERCIEMENT

D'abord je remercier Allah de m'avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce travail.

Il ne m'aurait été possible, à moi seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de mon encadreur le professeur **BENCHEIKH MOHAMED**.

Je tiens aussi à remercier l'ingénieur de laboratoire de développement Géomatériaux Université de M'sila **CHOUKEIR SAWSEN** pour leur conseil, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Mes sincères remerciements vont au chef de département de génie civil **Mr. BAALI LAÏD**

mes remerciements vont aussi au président et aux membres du jury de soutenance qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

*Mekkaoui Hanane*

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*Aux fleurs de ma vie, mes très chers parents pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientation dans ma vie.*

*Mon père Hamida et ma mère Habiba*

*A mes frères : Fateh, Saad Eddin et Ismail et mes sœurs : Lila et Hour*

*Aux familles : Mekkaoui et Alili*

*A mon fiancé « Moustafa » de m'avoir aidé et de rester avec moi.*

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet*

*A tout la promotion de Génie Civil Master 2 « matériaux » 2019.*

*Ce document doit représenter le mémoire que toute la famille attendait avec ardeur.*

*Mekkaoui Hanane*



## **RESUME**

La terre crue, utilisée depuis onze millénaires, reste aujourd'hui le matériau de construction le plus répandu à travers le monde. Un tiers de l'humanité vit dans un habitat en terre, soit plus de deux milliards de personnes dans 150 pays. Les architectures de terre, simples ou monumentales, sont présentes dans des contextes variés et répondent à des besoins très divers. La recherche présentée porte sur l'application de la méthode des plans d'expériences (MPE), à l'étude des caractéristiques mécaniques des briques de terre comprimée et stabilisée au ciment. Contrairement aux autres matériaux de construction, tels que le béton et l'acier, la composition relativement non précise et non normalisée de la terre rend ce matériau difficile à identifier et à caractériser. En effet, le matériau terre devrait passer par une série d'essais pour caractériser son aptitude à l'emploi dans le secteur de la construction.

La résistance en compression des échantillons a été faite avec la presse de compression après la cure des briques selon les périodes d'essai fixés à 7 et 28 jours. Les mesures de la résistance à la compression étaient faites par la méthode d'écrasement des briques sèche (directement sortie de la conservation)

Les recherches sont menées dans le Laboratoire de développement Géo matériaux université de M'sila.

## **MOTS-CLÉS**

La méthode des plans d'expériences, caractéristiques mécaniques, terre comprimée, terre stabilisée au ciment, brique de terre, argile, chaux, cure.

## **ABSTRACT**

Raw earth, used for eleven millennia, remains today the building material most prevalent worldwide. One third of humanity lives in a habitat earth made more than two billion people in 150 countries. The earthen architecture, simple and monumental, are present in various contexts and respond to diverse needs

The research presented concerns the application of the experimental design method (EDM) to the study of the mechanical characteristics of compressed and cement stabilized clay bricks. Unlike other building materials, such as concrete and steel, the relatively non-precise and non-standardized composition of the earth makes this material difficult to identify and characterize. Indeed, the earth material should pass by a series of tests to characterize its suitability for use in the construction sector.

The compressive strength of the samples was made with the compression press after curing of the bricks according to the test periods set at 7 and 28 days. Measurements of the compressive strength were made by the method of crushing dry bricks (directly out of conservation) The research is conducted in the GeoMaterials Development Laboratory of M'sila University.

## **KEYWORDS**

Experimental design method, mechanical characteristics, earth compressed, stabilised with the cement, the bricks of earth, clay, lime, cure .

## ملخص

لا تزال الأرض الخام ، المستخدمة منذ أحد عشر ألف عام ، مواد البناء الأكثر انتشارًا في جميع أنحاء العالم. يعيش ثلث البشر في موانئ ترابية ، أكثر من ملياري شخص في 150 دولة. أبنية الأرض ، بسيطة أو ضخمة ، موجودة في مجموعة متنوعة من السياقات وتلبي مجموعة واسعة من الاحتياجات

يتعلق البحث المقدم بتطبيق طريقة التصميم التجريبية (MPE) لدراسة الخواص الميكانيكية للطوب الطيني المضغوط والمثبت بالاسمنت. على عكس مواد البناء الأخرى ، مثل الخرسانة والفولاذ ، فإن مكونات التربة الغير مستقرة تجعل منها مادة من الصعب تحديد مواصفاتها وخصائصها، ولهذا يجب تطبيق عدة تجارب على التربة لجعلها صالحة للاستخدام في قطاع البناء.

تم تصنيع القوة الانضغاطية للعينات بواسطة مكبس الضغط بعد معالجة الطوب وفقًا لفترات الاختبار المحددة في 7 و 28 يومًا. تم إجراء قياسات القوة الانضغاطية بواسطة طريقة تكسير الطوب الجاف (خارج الحفظ مباشرة) يتم إجراء البحث في مختبر تطوير المواد بجامعة المسيلة

## الكلمات المفتاحية

طريقة التصميم التجريبية, الخصائص الميكانيكية, التربة المضغوطة, التربة المستقرة بالاسمنت, طوب التربة, الطين, الجير, حفظ الخرسانة.

# Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale .....1

## CHAPITRE I : Etude Bibliographique et Présentation

I.1 Introduction : .....6

I.2 Rappel historique sur la terre crue : .....6

I.3 La terre : .....8

I.4 Description et caractérisation des principales techniques constructives de la terre crue :  
.....9

I.4.1 Adobe : .....10

I.4.2 Pisé: .....13

I.4.3 Torchis : .....15

I.4.4 Bauge : .....16

I.4.5 Bloc de terre comprimée: .....16

I.5 Avantages de la terre crue : .....17

➤ Économiques: .....17

➤ Écologiques: .....17

➤ Disponibilité: .....17

➤ Confort: .....17

➤ Qualité architecturale : .....17

I.6 Bloc de terre comprimée (BTC) : .....17

I.6.1 Définition : .....17

I.6.2 Performances techniques : .....19

I.6.3 Diversités des produits de blocs de terre comprimée : .....20

I.7 Actualité de l'architecture de terre en Algérie : .....22

I.8 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde : .....25

I.9 Rappel sur les argiles : .....	26
I.9.1 Définition : .....	26
I.9.2 Principaux types d'argiles : .....	26
I.9.3 Classification des argiles : .....	29
I.10 Ciment: .....	29
I.11 La chaux : .....	31
I.12 Recommandation pour l'utilisation des sols : .....	32
I.12.1 Texture ou Granularité : .....	33
I.12.2 La plasticité : .....	33
I.12.3 La compressibilité: .....	34
I.12.4 La cohésion: .....	34
I.13 Stabilisation : .....	34
I.13 .1 Définition : .....	35
I.13.2 objectif : .....	35
I.13.3 procédés : .....	35
a) Stabilisation mécanique : .....	35
b) Stabilisation physique : .....	35
c) Stabilisation chimique : .....	35
I.13.4 Moyens de stabilisation : .....	36
I.14 Stabilisation au ciment : .....	36
I.14.1 Généralités : .....	36
I.14.2 Mécanisme de stabilisation : .....	37
I.15 Stabilisation à la chaux : .....	39
I.15.1 Généralités : .....	39
I.16 Densification par compression : .....	39
Conclusion: .....	40

## **CHAPITRE II : Matériaux de l'Etude et Techniques Expérimentales**

II.1 Introduction : .....	42
II.2 Matériaux utilisés : .....	42
II.2.1 Origine de la terre : .....	42
II.2.2 Caractérisation et méthodes expérimentales : .....	43
II.2.2.1 Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) : .....	43
II.2.2.2 Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051) : .....	47
II.2.2.3 Composition minéralogique (DRX): .....	49
II.2.3 Ciment : .....	51

II.2.4 La chaux : .....	52
II.2.5 L'eau de gâchage : .....	53
Conclusion : .....	53

### **CHAPITRE III: Méthode des Plans d'Expériences**

III.1 Introduction : .....	55
III.2 Choix de la méthode d'expérimentation : .....	55
III.3 Les différents types de facteurs : .....	55
III.4 Notion d'espace expérimental : .....	56
III.5 Notion de surface de réponse : .....	59
III.6 Notion de modélisation mathématique : .....	60
III.7 Le modèle de l'expérimentateur : .....	60
III.8 Logiciel utilisé : .....	61
III.8.1 Présentation de logiciel « Minitab » : .....	61
III.8.1.1 Diagramme de Pareto : .....	61
III.8.1.2 Graphique des effets : .....	61
III.8.1.3 Graphique des interactions : .....	61
Conclusion : .....	62

### **Chapitre IV : Elaboration d'un Modèle Expérimental des BTCS**

IV.1 Introduction : .....	64
IV.2 Confection des blocs : .....	64
IV.2.1 Mélanges : .....	64
IV.2.2 Préparation des mélanges : .....	64
IV.2.2.1 Etapes de préparation : .....	64
IV.2.2.2 Préparation du mélange .....	68
IV.3 La cure des éprouvettes : .....	70
IV.4 Essai de compression (la norme P 18-406) : .....	70
IV.5 Essai de flexion : .....	71
Conclusion : .....	73

### **CHAPITRE V: Résultats et Interprétations**

V.1 Introduction : .....	75
V.2 résultats des essais : .....	75
V.2.1 les masses volumiques des BTCS : .....	75
V.2.2 les résistances mécaniques à 7 j des BTCS : .....	76
V.2.3 les résistances mécaniques à 28 j des BTCS : .....	77
V.2.4 les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab : .....	78

V.2.4.1 diagramme de Perto des effets pour la masse volumique : .....	78
V.2.4.2 Les effets principaux pour la masse volumique : .....	79
V.2.4.3 Interactions des facteurs : .....	80
*Equation de Modélisation : .....	81
Conclusion : .....	81
V.2.4.4 diagramme de Perto des effets pour la résistance à 7 jours : .....	81
V.2.4.5 Les effets principaux pour la résistance à 7 jours : .....	82
V.2.4.6 Interactions des facteurs : .....	83
*Equation de Modélisation : .....	84
V.2.4.7 diagramme de Perto des effets pour la résistance à 28 jours : .....	84
V.2.4.8 Les effets principaux pour la résistance à 28 jours : .....	85
V.2.4.9 Interactions des facteurs : .....	86
*Equation de Modélisation : .....	87
Conclusion : .....	87
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>89</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>91</b>
<b>Annexes</b>	

## Listes des figures

<b>Figure I.1 :</b> Constructions en terre dans le monde; (a) Ville de Shibam, Yémen; (b) Grande Muraille de Chine, Chine; (c) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique; (d) Grande Mosquée de Djenné, Mali; (e) Citadelle de Bam, Iran. ....	7
<b>Figure I.2 :</b> Architecture de terre dans le monde (Source : <a href="http://craterre.org/">http://craterre.org/</a> ).....	8
<b>Figure I.3 :</b> "Roue" des techniques de construction en terre (Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 26) .....	9
<b>Figure I.4 :</b> Moulage et séchage des blocs adobes.....	11
<b>Figure I.5 :</b> Bloc d'adobe de laboratoire Géo matériaux à l'Université de M'sila.....	11
<b>Figure I.6 :</b> Moule de l'adobe. ....	12
<b>Figure I.7 :</b> Constructions en adobe : Shibam, Yémen ; Ghadamès, Libye ; Lima, Pérou.....	12
<b>Figure I. 8 :</b> Cycle de production du pisé. ....	14
<b>Figure I.9 :</b> Patrimoine en pisé : (a) la grande muraille de Chine,(b) l'Alhambra de Grenade ,(c) les tulous des Hakkas (d) Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech ,(e & f) de nombreuses fermes, habitations rurales et manoirs en France . ....	15
<b>Figure I.10 :</b> (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France. ....	15
<b>Figure I.11 :</b> Constructions en torchis : (a) Safranbolu, Turquie ;(b) Diamantina, Brésil ; (c) Strasbourg, France.....	15
<b>Figure I.12 :</b> Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge.....	16
<b>Figure I.13 :</b> cycle de production des blocs de terre comprimée (V.HOUBEN et AL, 1994)....	18
<b>Figure (I.14) (I.15) :</b> Brique de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle .....	19
<b>Figure I.16 :</b> Différents produits de blocs de terre comprimée .....	21
<b>Figure I.17 :</b> Atelier d'initiation aux techniques de construction en terre. Timimoun.....	23
<b>Figure I.18 :</b> Premières assises du Prototype de Souidania 1999 (LE CNERIB).....	23
<b>Figure I.19 :</b> Nouveau village agricole de Maadher, près de M'sila en Algérie construit en parpaings de terre stabilisée en 1980 par deux architectes, les frères El Miniaway. ....	24
<b>Figure I.20 :</b> Maison construit en terre de la ville de Magra wilaya de M'sila.....	24
<b>Figure I.21 :</b> Maison construit en adobe M'sila.....	24
<b>Figure I.22 :</b> Maison palmier à Marrakech, Maroc .....	25
<b>Figure I.23 :</b> Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau, France.....	25
<b>Figure I.24:</b> Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde. ....	25
<b>Figure I.25 :</b> Schéma de la structure de la kaolinite, (d'après Lambe, 1953) .....	27

<b>Figure I.26 :</b> Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim, 1986)	27
<b>Figure I.27 :</b> Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe, 1953)	28
<b>Figure I.28 :</b> Structure de la montmorillonite (Reinholdt, 2001)	28
<b>Figure I.29:</b> Schéma de la structure de l'illite. D'après Lambe, 1953	28
<b>Figure I.30:</b> Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz, 1991)	28
<b>Figure I.31:</b> Le cycle de chaux.	31
<b>Figure I.32 :</b> Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, 2001).	40
<b>Figure II.1 :</b> Argile n°1 $Arg_{rge}$	42
<b>figure II.2 :</b> Argile n°2 $Arg_{vrt}$	42
<b>figure II.3 :</b> Argile n°3 $Arg_{grs}$	42
<b>Figure II. 4:</b> Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.	43
<b>Figure II. 5:</b> Courbe granulométrique d'argile $Arg_{grs}$	44
<b>Figure II. 6:</b> Courbe granulométrique d'argile $Arg_{rge}$ .	45
<b>Figure II. 7:</b> Courbe granulométrique d'argile $Arg_{vrt}$ .	46
<b>Figure. II.8 :</b> Présentation des limites d'Atterberg.	47
<b>Figure II.9 :</b> Limite de plasticité au rouleau	48
<b>Figure II.10 :</b> Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.	48
<b>Figure II.11 :</b> Diagramme de Casagrande.	48
<b>Figure II.12 :</b> Appareillage Diffractomètre.	50
<b>Figure II.13 :</b> Les deux types de ciment utilisé.	51
<b>Figure III. 1 :</b> Le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur.	56
<b>Figure III. 2:</b> L'espace expérimental d'un facteur.	57
<b>Figure III. 3:</b> Les points expérimentaux dans un espace expérimental.	58
<b>Figure III. 4:</b> Les points expérimentaux dans un domaine d'étude.	58
<b>Figure III. 5:</b> L'ensemble des réponses qui correspondent à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.	59
<b>Figure IV. 1 :</b> Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTCS	65
<b>Figure IV. 2 :</b> Le malaxeur utilisé.	66
<b>Figure IV. 3:</b> Les matériaux.	66
<b>Figure IV.4 :</b> Le moule utilisé.	66

<b>Figure IV. 5 :</b> Extracteur mécanique.....	66
<b>Figure IV.6 :</b> Presse manuelle du laboratoire de développement Géo matériaux, université de M'sila.....	67
<b>Figure IV.7 :</b> Des éprouvettes confectionnées.....	67
<b>Figure IV.8 :</b> L'étuve utilisée pour la cure (du laboratoire de développement Géomatériaux université de M'sila). ....	70
<b>Figure IV.9 :</b> Presse hydraulique pour l'essai de compression. ....	71
<b>Figure IV.10 :</b> L'essai de flexion d'après « CNERIB » .....	72
<b>Figure IV.11 :</b> Briques de terre comprimées et stabilisées .....	72
<b>Figure V.1 :</b> Diagramme des effets pour la masse volumique. ....	78
<b>Figure V.2 :</b> Graphique des effets principaux pour la masse volumique. ....	79
<b>Figure V. 3:</b> Diagramme des interactions entre les constituants pour la masse volumique.....	80
<b>Figure V.4 :</b> Diagramme des effets pour la résistance à 7 jours. ....	81
<b>Figure V.5 :</b> Graphique des effets principaux pour la résistance à 7 jours. ....	82
<b>Figure V.6 :</b> Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours.....	83
<b>Figure V.7 :</b> Diagramme des effets pour la résistance à 28 jours. ....	84
<b>Figure V.8:</b> Graphique des effets principaux pour la résistance à 28 jours. ....	85
<b>Figure V.9 :</b> Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours.....	86

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Les différentes techniques de construction en terre crue (CRATerre, 1995) .....	10
<b>Tableau I.2 :</b> Performances techniques des blocs de terre comprimée.....	20
<b>Tableau I.3 :</b> Les opérations de construction en terre en Algérie. Source : CNERIB. ....	22
<b>Tableau I.4 :</b> Liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.....	30
<b>Tableau I.5 :</b> Moyens de stabilisation des terres remaniées .....	36
<b>Tableau II.1 :</b> Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>Arg<sub>grs</sub></i> .....	44
<b>Tableau II.2 :</b> Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>Arg<sub>rge</sub></i> .....	45
<b>Tableau II.3 :</b> Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>Arg<sub>virt</sub></i> .....	46
<b>Tableau II.4 :</b> Les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 03 types des argiles. ...	49
<b>Tableau II.5.a :</b> Composition minéralogique des échantillons (%).....	50
<b>Tableau II.5.b :</b> Composition minéralogique des échantillons (%).....	51
<b>Tableau II.6 :</b> Fiche technique des propriétés physique et chimiques de la chaux de Saida.....	52
<b>Tableau IV.1 :</b> Les facteurs choisis .....	68
<b>Tableau IV.2 :</b> Composition des différents mélanges employés dans cette étude.....	69
<b>Tableau V.1 :</b> Les résultats des masses volumiques des BTC .....	75
<b>Tableau V.2 :</b> Les résultats des résistances mécaniques à 7j des BTC.....	76
<b>Tableau V.3 :</b> Les résultats des résistances mécaniques à 28j des BTC .....	77

## Liste des Abréviations

**A.S.T.M** : American Society for Testing and Materials.

**AFNOR** : Association française de normalisation.

**AIPEA** : Association Internationale Pour l'Etude des Argiles.

**BTC** : Bloc de terre comprimée.

**BTCS** : Briques de terre comprimées et stabilisées.

**CRATERRE** : Centre international de la construction en terre.

**CNERIB** : Centre Nationale d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

**CRS** : ciment résistant aux sulfates.

**MV** : la masse volumique.

**Rc hum** : Résistance à la compression humide à 28 jours.

**Rc sec** : Résistance à la compression sec à 28 jours.

**RF sec** : Résistance à la flexion sec à 28 jours.

**R7 j** : résistance à la compression à 7 jours.

**R28 j** : résistance à la compression à 28 jours.

**RT sec** : Résistance à la traction sèche à 28 jours.

**UNESCO** : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

**« INTRODUCTION  
GENERALE »**

### Introduction générale :

Le monde vit une crise économique après la baisse du prix du pétrole, et il aura des répercussions sur le domaine de la construction qui connaît la hausse des prix élevés et des matériaux de construction privé en termes de prix extrait et vendu en plus du prix du transport.

Le prix des matériaux de construction dépend donc du marché international constamment déstabilisé par la crise économique doublée de la crise de l'énergie ces dernières années. Pour produire un cadre de vie à moindre coût, il importe maintenant de contourner l'influence du coût de l'énergie en revalorisant les matériaux locaux de construction.

Ces matériaux locaux tels que la terre, gypse, le bois etc. ont servi fidèlement dans la construction de l'habitat social depuis le commencement de l'humanité [1].

Les sites archéologiques découverts dans de nombreux endroits à travers la planète témoignent de la maîtrise de l'homme des techniques de construction à base de la terre crue depuis les premières civilisations. Aujourd'hui on estime que l'habitat d'un tiers de l'humanité est encore en terre.

Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction jamais connues auparavant, nous enregistrons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans plusieurs pays y compris les pays industrialisés profitant du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques [2].

La terre a longtemps été utilisée comme matériaux de construction puis abandonnée au bénéfice des nouvelles technologies. Ainsi, l'utilisation du béton offrait des caractéristiques très intéressantes pour les ingénieurs qui à l'époque n'avaient pas la problématique environnementale [3].

Aujourd'hui, face à une prise de conscience en faveur de la protection de l'environnement on pourrait penser que le matériau terre répond absolument aux nouvelles exigences tout en respectant l'environnement sur tout son cycle de vie. Dans ce contexte, l'architecture de terre recèle plusieurs avantages, sur différents plans ; tant social, économique ,environnemental que culturel. La disponibilité du matériau et son faible cout lui promettent un large usage, c'est pour cette raison qu'à dater des années 1980, un regain d'intérêt mondial pour ces architectures implusé à partir de l'Afrique ,et se manifeste sur tous les continents.

L'architecture de terre n'est donc pas seulement un vestige du passé mais une composante vivante de la vie contemporaine ceci est particulièrement vrai dans notre monde fragile actuel ou

les questions de durabilité dans l'environnement et le social prennent de plus en plus d'importance.

Des programmes d'amélioration, de conservation et de gestion du patrimoine architectural en terre sont entrepris à travers le monde, des projets pilotes ont fourni des exemples pour le développement et la diffusion de méthodes et technique appropriées dans la construction en terre, ou la conservation et le développement font partie d'un processus continu. La recherche scientifique en outre a permis de promouvoir et d'améliorer les savoir-faire dans ce domaine [4].

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable [5].

L'utilisation du ciment ou de la chaux dans la stabilisation de la terre en général est un domaine assez connu grâce aux importants travaux de laboratoire et réalisations sur le terrain. ces travaux ont permis de connaître les mécanismes de réactions entre la terre et ces liants, leurs effets sur les propriétés de la terre [6].

L'objectif de ce travail consiste à apporter notre contribution à la valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et la chaux Afin de valoriser les matériaux locaux et réduire les coûts de construction et de l'énergie consommée.

Outre l'introduction générale, ce mémoire de thèse est structuré comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC), les différents matériaux utilisés, et les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.
- ✓ Le deuxième chapitre concerne l'ensemble des méthodes et techniques utilisées ainsi que les matériels et les moyens mis en œuvre les essais d'identification des matériaux,
- ✓ Le troisième chapitre nous avons présentés petite présentation sur le plan d'expérience et une définition de logiciel utilisé dans notre recherche « Minitab ».
- ✓ Le quatrième chapitre présente les essais réalisés sur la brique de terre comprimée BTC, ce chapitre présente aussi les mélanges et les procédures de confection les éprouvettes.
- ✓ Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le dernier chapitre.
- ✓ Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents ainsi que des recommandations.

**CHAPITRE I:**  
**« ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**  
**ET**  
**PRESENTATION »**

## I.1 Introduction :

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

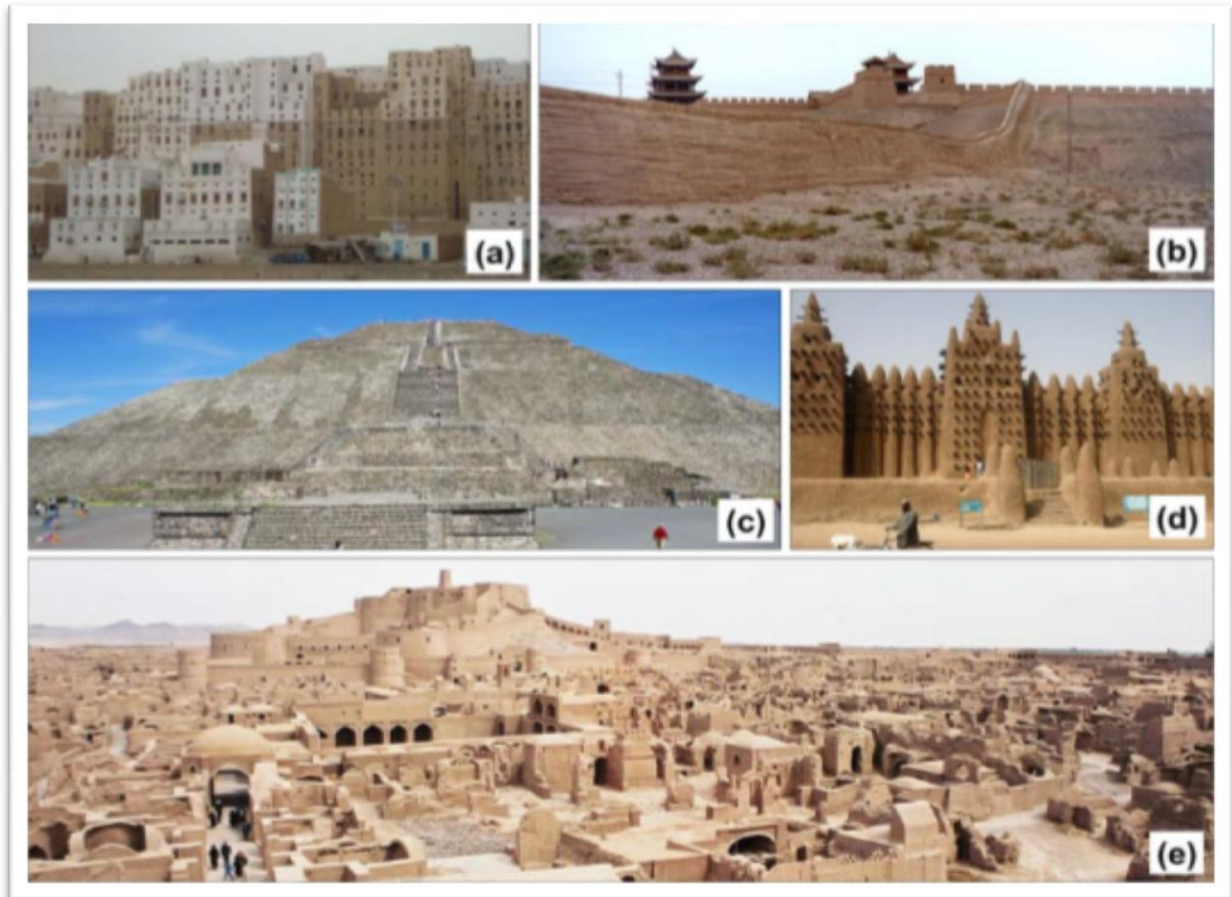
Par ailleurs, la diversité des procédés de l'architecture de terre et la simplicité de sa mise en œuvre, sont deux points forts qui lui procurent l'autonomie technologique et la diminution de l'impact tant financier qu'environnemental de la construction grâce aux économies d'énergie.

Ces architectures sont ancrées dans la vision contemporaine de progrès [4].

## I.2 Rappel historique sur la terre crue :

L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux plus "nobles". C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des civilisations les plus glorieuses de l'Antiquité. Les trouvailles archéologiques de maintes contrées en témoignent. Les strates du temps n'ont pas pu effacer les preuves accumulées, tout juste dissimulées. L'époque actuelle soigne ses vestiges : les ruines sont révélées et relevées, classées, protégées et restaurées. Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours. La construction en terre fut indépendamment développée dans les principaux foyers connus de la civilisation dans les vallées inférieures du Tigre et de l'Euphrate, le long du Nil, sur les rives de l'Inde et du Huanghe. Ces régions fertiles furent propices à l'installation des communautés de chasseurs-collecteurs puis au développement de la révolution agricole.

Des exemples d'architectures remarquables en terre sont présents sur tous les continents (voir Figure I.1). La citadelle de Bam en Iran compte des parties de plus de 2500 ans; la grande mosquée de Djenné au Mali est le plus grand édifice en terre; la grande Muraille de Chine, vieille de 4000 ans, était à l'origine construite en terre mais fut ensuite couverte de pierres; la pyramide du Soleil, à Teotihuacan au Mexique fut construite en terre crue aux alentours de 200 avant J-C; la ville de Shibam au Yémen, qui s'étend sur près de 20 000 m<sup>2</sup>, date du 15<sup>ème</sup> siècle [1].



**Figure I.1 : Constructions en terre dans le monde; (a) Ville de Shibam, Yémen; (b) Grande Muraille de Chine, Chine; (c) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique; (d) Grande Mosquée de Djenné, Mali; (e) Citadelle de Bam, Iran.**

Mais quelle est la raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau ? Elle est plutôt simple : en effet, il s'agissait de « construire avec ce que l'on a sous les pieds ». Si on prend l'exemple de la Grande Muraille de Chine, on peut voir que celle-ci s'adapte tout au long de son parcours à la nature du sol sur laquelle elle est construite. Ainsi, on retrouve des parties construites en pierre sur la roche, en terre sur la terre et même parfois en sable dans certaines parties désertiques. En effet, vu l'ampleur des territoires traversés par cet édifice, celui-ci a été construit à l'aide des matériaux locaux afin de limiter le transport de la zone d'extraction à celle de chantier. Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible [7]. Des études estiment « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre » [8]. De plus, la terre est relativement facile à extraire et à utiliser : de simples outils comme une pelle ou des planches en bois sont largement suffisants dans la plupart des cas.

Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l’Afrique, le Moyen-Orient et l’Amérique latine (Figure I.2). On les retrouve également en Chine et en Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l’Est, mais également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique. L’Europe compte tout de même plusieurs millions de constructions en terre, mais il s’agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher [9].



Figure I.2 : Architecture de terre dans le monde (Source : <http://craterre.org>)

### I.3 La terre :

La terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. A l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil ou encore le gel, les particules de roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petits, les sédiments. Les matières organiques présentes dans le sol contribuent également à sa dégradation [10].

#### I.4 Description et caractérisation des principales techniques constructives de la terre crue :

De l'Amérique latine jusqu'en Chine, le matériau terre et l'architecture en terre sont représentés sous différentes techniques de construction et de fabrication [11]. Parmi les techniques les plus connues, on cite : le pisé, l'adobe, (ou thob) les blocs de terre comprimée (BTC), les blocs de terre stabilisée (BTS), la terre paille et le torchis. Elles font l'objet actuellement d'un développement technologique tant sur le plan de la maîtrise et de l'amélioration des performances que sur le processus de production.

H. Guillaud et H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre (Figure I.3), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. En plus d'être simplificateur, ce tableau circulaire ne fait pas non plus la distinction entre les techniques traditionnelles et les techniques nouvelles [12].

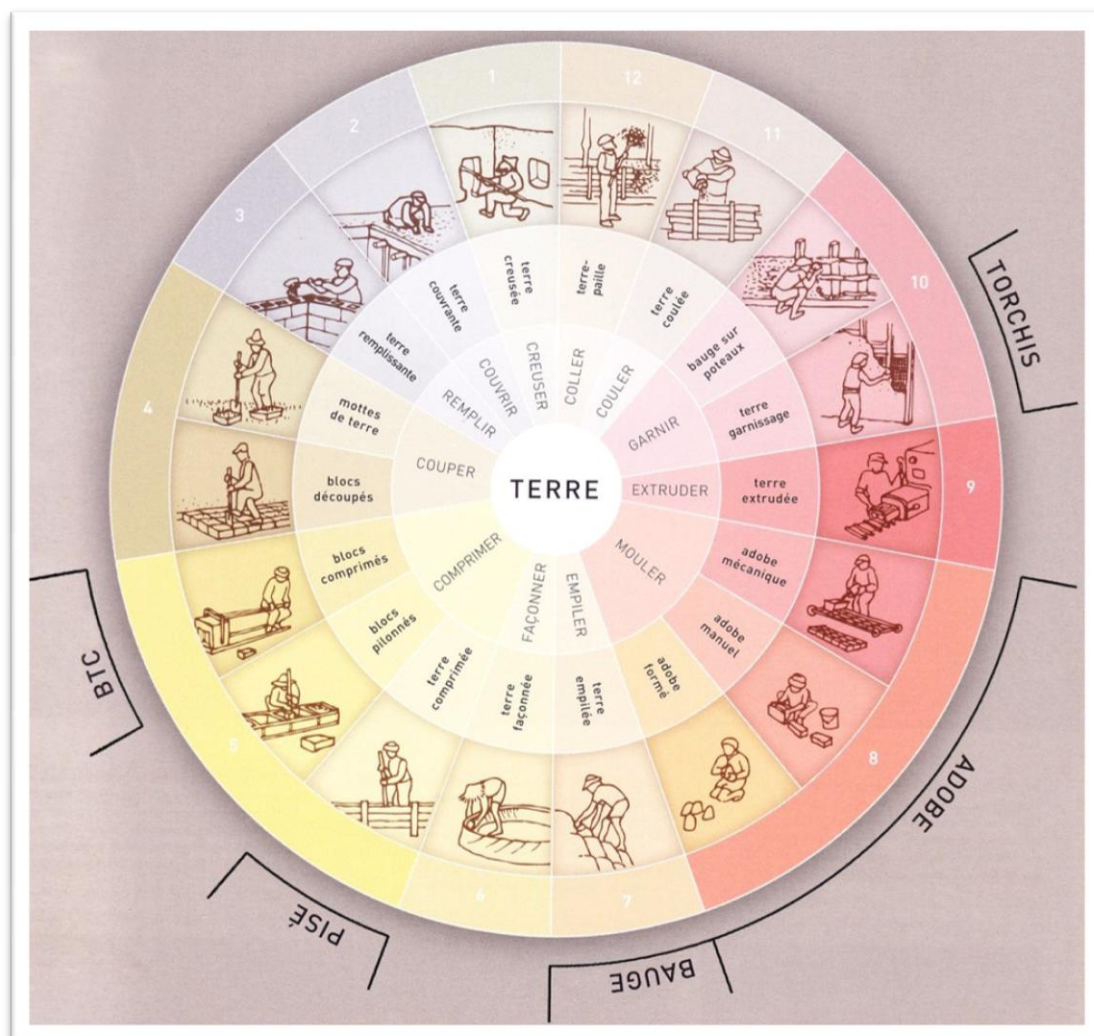


Figure I.3 : "Roue" des techniques de construction en terre (Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 26)

Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol (habitat troglodytique)
Terre recouvrante	La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau
Terre remplissante	La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe
Terre découpée	Des blocs de terre sont directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages
Terre façonnée	La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces
Terre empilée	Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais
Terre moulée	La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules de formes divers
Terre extrudée	La terre est extrudée par une machine puissante
Terre coulée	La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules, comme un béton
Terre-paille	Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau léger
Terre garnissante	La terre mêlée de fibres est appliquée en couches minces pour garnir le support

**Tableau I.1 Les différentes techniques de construction en terre crue (CRATerre, 1995)**

#### **I.4.1 Adobe :**

##### **a. Définition :**

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

Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (figure I.4). La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25 X 10 cm soit 30 X 60 X 10 cm.

La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen – Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique.



**Figure I.4 : Moulage et séchage des blocs adobes**

(<http://www.fredericbekas.com/memzeh-bioclimatique-construit-en-briques-dadobe-route-de-lourika-marrakech-2/>)



**Figure I.5 : Bloc d'adobe de laboratoire Géo matériaux à l'Université de M'sila**



Figure I.6 : Moule de l'adobe.

### **b. Les avantages de l'adobe:**

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

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



Figure I.7 : Constructions en adobe : Shibam, Yémen ; Ghadamès, Libye ; Lima, Pérou

(Sources : socks-studio.com ; WHEAP, 2012 : pp. 58 & 195)

**I.4.2 Pisé:****a. Définition:**

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

**b. Les avantages de pisé :**

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

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité de stocker la chaleur et de la restituer par rayonnement.
- Bonne isolation phonique et qualité acoustique.
- Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire [13].

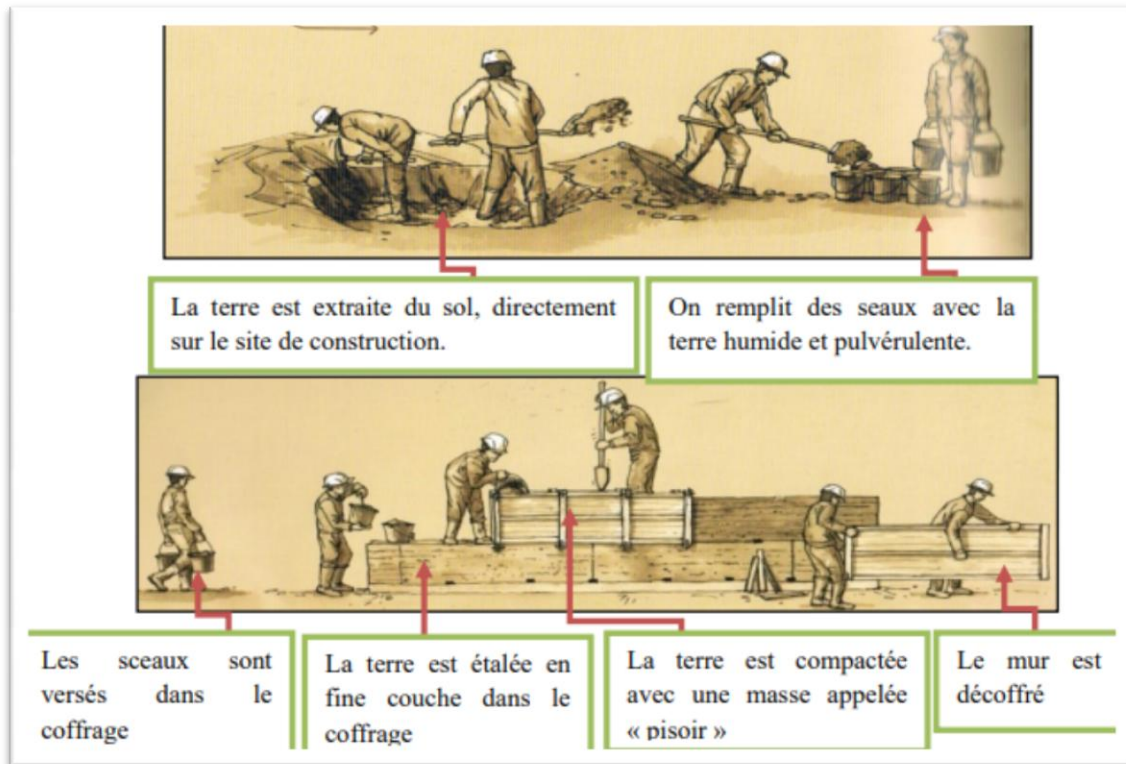


Figure I. 8 : Cycle de production du pisé.

(Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. Op.cit., p28.)



Figure I.9 : Patrimoine en pisé : (a) la grande muraille de Chine,(b) l’Alhambra de Grenade ,(c) les tulous des Hakkas (d) Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech ,(e & f) de nombreuses fermes, habitations rurales et manoirs en France .

(Sources : ideesrevues.com ; lab.rtve.es ; www.marketing-chine.com ; blog.webviajes.com ; inspirationgreen.com ; wallpapers.brothersoft.com)

### I.4.3 Torchis :

La technique du torchis utilise une ossature en bois emplie de terre, ou le plus souvent d'un mélange de terre et de paille. Le matériau à l'état plastique est ainsi forcé de remplir les espaces vides. La surface peut être laissée telle qu'elle ou enduite pour obtenir des finitions plus régulières. Les murs en torchis ne sont pas porteurs et leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm. La Figure 1.10(a) montre un mur en torchis pendant sa construction, tandis que la Figure 1.10(b) est un édifice en torchis situé à Angers, en France.



Figure I.10 : (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France.



Figure I.11 : Constructions en torchis : (a) Safranbolu, Turquie ;(b) Diamantina, Brésil ;  
(c) Strasbourg, France

(Sources : WHEAP, 2012 : pp. 150 & 164 ; adispne.fr)

#### I.4.4 Bauge :

La bauge est montée en piles de terre autoportantes sans l'aide de mortier ou de coffrage. Pour ce type de constructions, la terre est légèrement humidifiée et est souvent mélangée à des fibres végétales. Le matériau mélangé est soit empilé à la main sous forme de monticules, soit jeté vigoureusement contre le mur. La surface rugueuse est ensuite enduite de manière à obtenir une paroi lisse. Étant données les quantités importantes d'eau apportées au matériau pendant la construction, des phénomènes de retrait de dessiccation importants sont susceptibles de se produire. Une sélection soigneuse de la terre et de la mise en œuvre est nécessaire. La faible énergie de compactage conduit à de faibles densités, même si le retrait tend à l'augmenter.



**Figure I.12 : Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge.**

La Grande Mosquée de Djenné illustrée dans la Figure I.1(d) est construite avec une technique locale basée sur le même procédé que la bauge [14].

#### I.4.5 Bloc de terre comprimée:

Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe [5].

### I.5 Avantages de la terre crue :

#### ➤ Économiques:

- Réduction de la fuite des devises par une diminution des matériaux importés (ciment, acier et bois)
- une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale.

#### ➤ Écologiques:

- réduction d'émission de CO<sub>2</sub>, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment,
- réduction importante d'énergie consommée pour le transport du matériau de construction.

#### ➤ Disponibilité:

- la terre est disponible en quantités quasiment illimitées dans la plupart des régions.
- production possible de l'échelle artisanale à l'échelle industrielle, possibilité de produire directement sur le chantier,

#### ➤ Confort:

- atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques à l'intérieur des bâtiments, grâce à une grande inertie thermique.
- autorégulation du taux d'humidité à l'intérieur des réalisations grâce aux matériaux

#### ➤ Qualité architecturale :

- produits aux dimensions standardisées, modulaires, réguliers et précis,
- permet la réalisation des architectures aux murs apparents [6].

### I.6 Bloc de terre comprimée (BTC) :

#### I.6.1 Définition :

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de piliers de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Elle a été développée aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie.

Le BTC est très régulier en forme et en dimension, ils sont pleins ou perforés ce qui permet de réaliser des travaux de maçonnerie très variés. Les blocs de terre comprimée, son fabriquées à partir de terre humide et compactée dans une presse.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre comprimée stabilisée ».

Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terre eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières [6].

Le cycle de la production de BTC est montré à la figure I.13 :

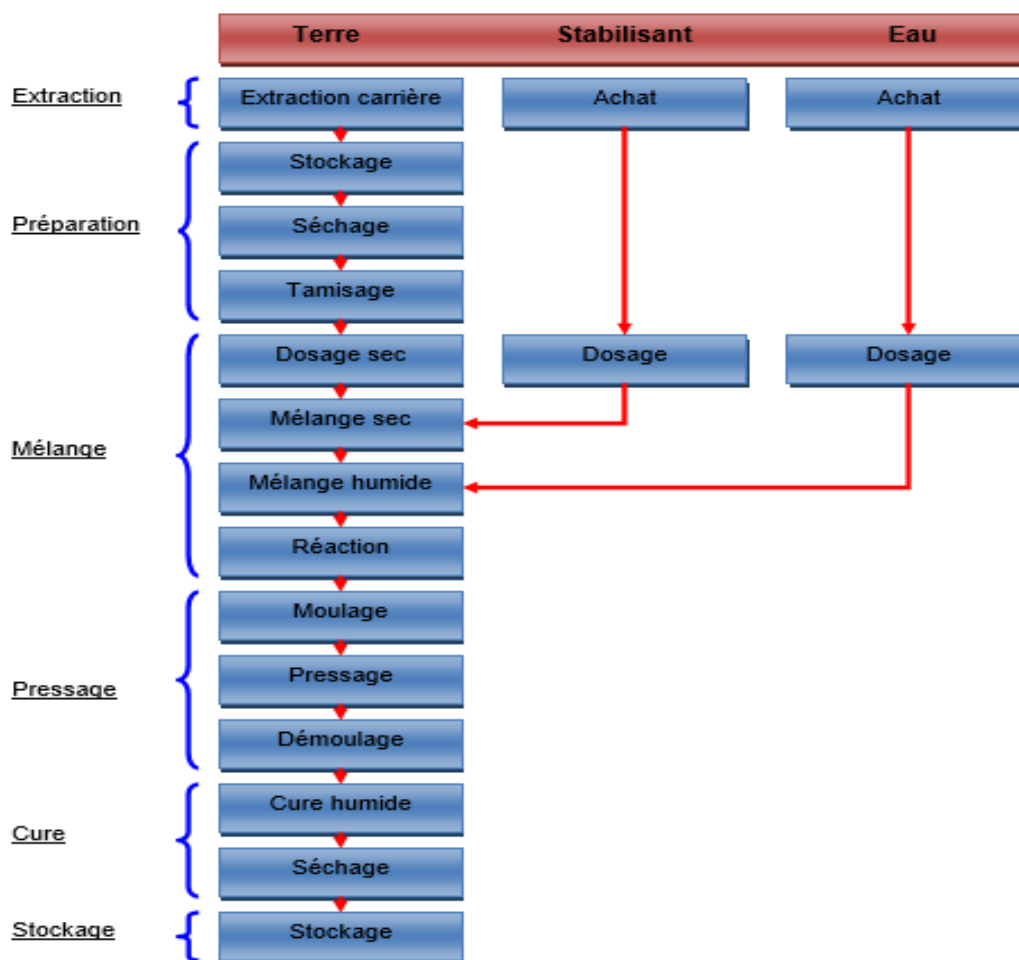
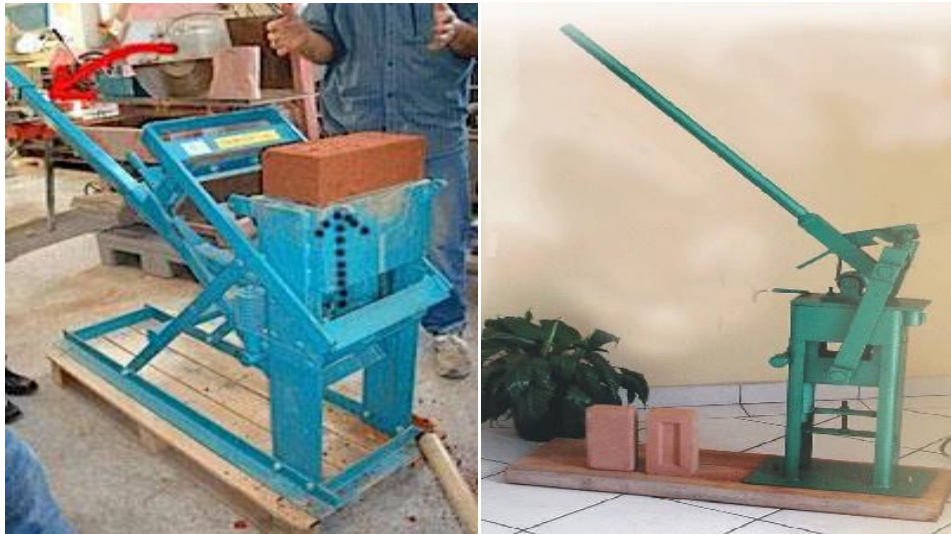


Figure I.13 : cycle de production des blocs de terre comprimée (V.HOUBEN et AL, 1994).



**Figure (I.14) (I.15) : Brique de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle**  
([www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-materiaux-construction-modernite-tradition-960/page/16/](http://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-materiaux-construction-modernite-tradition-960/page/16/))

### **I.6.2 Performances techniques :**

Les performances techniques des blocs de terre comprimée que l'on peut observer en conditions réelles de production sont extrêmement variées. Toutefois, une analyse de ces performances permet de dégager quatre grands types de blocs. A ces quatre types de blocs ne correspondent pas forcément des moyens de production déterminés.

On peut cependant associer les conditions suivantes :

- type 1 : bloc de terre comprimée non stabilisée.
- type 2 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit dans des conditions correctes.
- type 3 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit avec soin, avec des équipements performants et faisant l'objet d'une démarche qualité.
- type 4 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit dans des conditions industrielles exceptionnelles [16].

Performances techniques des blocs de terre comprimée						
Caractéristiques Mécaniques	Symbole	Unité	Type de bloc de terre comprimée			
			Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Résistance à la compression sec à 28 jours (+40% après 1 an, +50% après 2 ans)	Rc sec 28	Mpa	= 2	2 4	> 4	>12
Résistance à la compression humide à 28 jours	Rc hum 28	Mpa	0,1 0,5	> 1	>2	>6
Résistance à la traction sec à 28 jours	RT sec 28	Mpa	0,5 1	0,2 0,4		>2
Résistance à la flexion sec à 28 jours	RF sec 28	Mpa	0,5 1			
Résistance au cisaillement sec à 28 jours	RcI sec 28	Mpa	=0,5			
Coefficient de poisson	$\mu$				0,15 0,35	
Module de Young	E	Mpa			700 7000	
Masse volumique apparente	P	Kg/m <sup>3</sup>	1700 2200	1700 2200	1700 2200	> 2200
Uniformité des dimensions			Bon	Bon	Excellent	Excellent

**Tableau I.2 : Performances techniques des blocs de terre comprimée**

### **I.6.3 Diversités des produits de blocs de terre comprimée :**

Aujourd'hui, la marche accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Voir figure I.16):

#### **a. Blocs pleins :**

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

**b. Blocs creux :**

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

**c. Blocs alvéolaires :**

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

**d. Blocs à emboitements :**

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

**e. Blocs parasismiques :**

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

**f. Blocs spéciaux :**

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique. [2]



Figure I.16 : Différents produits de blocs de terre comprimée

**I.7 Actualité de l'architecture de terre en Algérie :**

Dans notre pays, les études menées récemment au Centre National d'Etudes et de Recherches intégrées au Bâtiment (CNERIB), montrent que l'utilisation de briques en terre crue comme remplissage d'une ossature en béton armé peut réduire de 32% le coût global des habitations, comparées à l'utilisation des matériaux conventionnels.

Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) mène ses recherches sur l'architecture de terre depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit [20] :

Années	Réalisations
1969	La réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	Une équipe Franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Moustafa ben Brahim près de Sidi Bel Abbés, réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en thoub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype fut réalisé au CNERIB en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Reggane en blocs de terre comprimée.
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en blocs de terre comprimée.
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en blocs de terre comprimée.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

**Tableau I.3 : Les opérations de construction en terre en Algérie. Source : CNERIB.**

Selon le rapport du CNERIB, l'Algérie compte plusieurs techniques se distinguant par leurs procédés de production. [21] Jusque-là nous n'avons pas encore rencontré d'études spécifiques sur les techniques pratiquées en Algérie. L'ouvrage de P. Odul ne présente que quelques exemples et ne s'étale pas sur l'ensemble des procédés traditionnels algériens.

L'Algérie ne dispose pas encore d'une réglementation propre à la construction en terre mais elle semble avoir établi ses bases grâce aux recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée approuvées en 1987. En 1988 le Centre Nationale d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a publié un document intitulé « Béton de terre stabilisée » qui renferme trois parties essentielles :

- Recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée.
- Guide technique du BTS (Béton de terre stabilisée).
- Notice pour l'utilisation de la presse BTS [21].



Figure I.17 : Atelier d'initiation aux techniques de construction en terre. Timimoun



Figure I.18 : Premières assises du Prototype de Souidania 1999 (LE CNERIB)



**Figure I.19 : Nouveau village agricole de Maadher, près de M'sila en Algérie construit en parpaings de terre stabilisée en 1980 par deux architectes, les frères El Miniaway.**



**Figure I.20 : Maison construit en terre de la ville Magra wilaya de M'sila**



**Figure I.21 : Maison construit en adobe M'sila**

**I.8 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde :**

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde, profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le Plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples fascinants : Maison palmier à Marrakech, Maroc (figure I.21), Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau à Lyon, France (figure I.22) et Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde (figure I.23) [2].

**Figure I.22 : Maison palmier à Marrakech, Maroc****Figure I.23 : Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau, France****Figure I.24 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde**

### **I.9 Rappel sur les argiles :**

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition de roches. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillets. Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux. Dans cette partie et pour définir cette nature physico-chimique, on présente la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles [2].

#### **I.9.1 Définition :**

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

L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferriques (lépidocrocite, maghémite...). Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  [13].

#### **1.9.2 Principaux types d'argiles :**

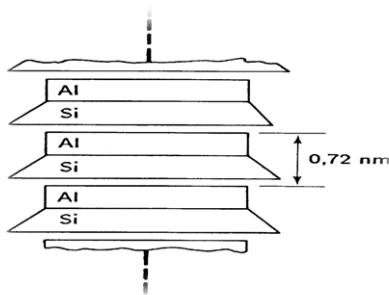
Il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

##### **a. La kaolinite :**

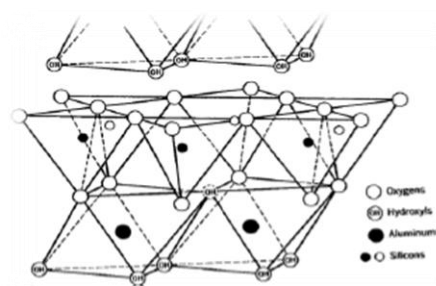
Les kaolinites sont des argiles dioctaédriques (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å (figure I.25 et figure I.26). Quand deux feuillets de kaolinite sont superposés, les O<sup>-</sup> présents sur la surface supérieure et les H<sup>+</sup> de la surface inférieure développent entre eux une liaison hydrogène O-H forte, assurant avec les liaisons de Van der Waals une grande stabilité à un empilement de feuillets vis-à-vis des actions de l'eau. Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites

(association de plusieurs feuillets), qui résultent de cet empilement, sont des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de quelques centaines de nm et qui ne permettent pas la pénétration de l'eau au sein de l'espace inter foliaire et la substitution entre les feuillets.

La liaison hydrogène forte entre les feuillets explique l'importance du nombre de feuillets par particule de kaolinite (de quelques dizaines à quelques centaines de feuillets solidement liés l'un à l'autre) et la faible valeur de la surface spécifique qui ne dépasse pas généralement 45 m<sup>2</sup>/g.



**Figure I.25 : Schéma de la structure de la kaolinite, (d'après Lambe, 1953)**



**Figure I.26 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite, (d'après Grim, 1986)**

### **b. La montmorillonite:**

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné :

chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å (figure I.27 et figure I.28). Ce désordre de feuillets et la constitution des faces inférieures/supérieures de ces argiles ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'adsorption des molécules variées (cations, eau, molécules organiques) au niveau de l'espace inter foliaire qui s'écarte. Par conséquent, la montmorillonite est très sensible à l'eau et un important gonflement de la particule peut se produire par adsorption de molécules d'eau entre les feuillets. L'épaisseur du feuillet peut alors varier de 9,6 Å à 15 Å, voire plus selon la nature du cation compensateur et l'hydratation de l'espace inter foliaire. Les montmorillonites sont généralement calciques, plus rarement sodiques suivant la nature du cation prédominant (calcium, sodium). Il est connu que le sodium confère des propriétés de gonflement supérieures à celles permises par la présence de calcium comme cation échangeable dans une argile.

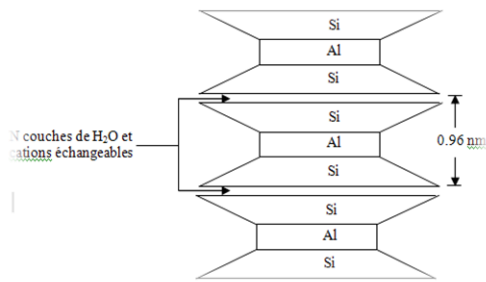


Figure I.27 : Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe, 1953)

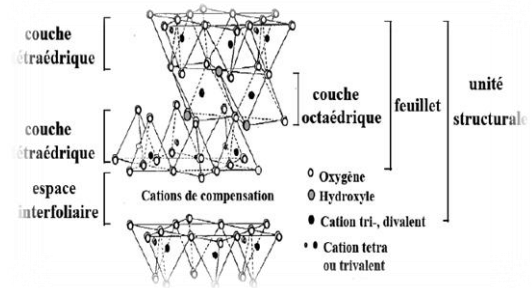


Figure I.28 : Structure de la montmorillonite (Reinholdt, 2001)

**c. L'illite :**

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite mais elle possède un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations inter foliaires de potassium  $K^+$  (figure I.29 et figure I.30). Les cations  $K^+$  ont la particularité de posséder exactement la même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillet par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillet, rendant ces ions non échangeables et hydratables. Les illites ont des feuillet d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des montmorillonites et la constitution de particules de grandes tailles [13].

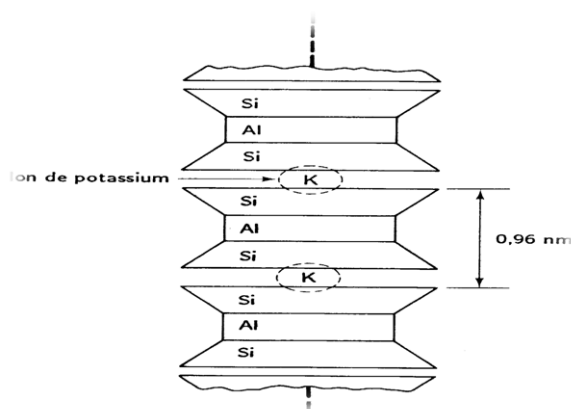


Figure I.29 : Schéma de la structure de l'illite. D'après Lambe, 1953.

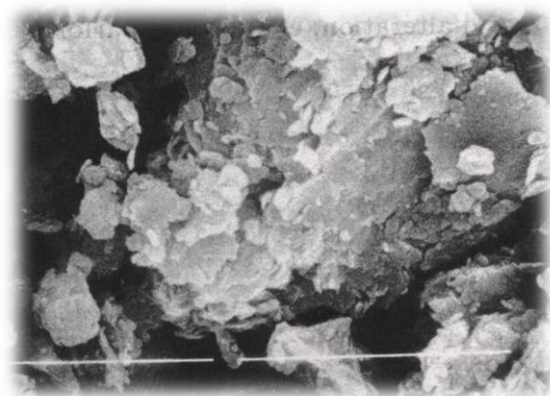


Figure I.30 : Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 µm. (Holtz,1991)

### I.9.3 Classification des argiles :

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972) et plus tard, ceux de [22] , ont permis d'aboutir a une classification qui repose sur l'utilisation des critères suivants:

- Type de feuillets 2:1 ou 1:1.
- Charge globale du feuillet.
- Nature des cations interfoliaires.

Il existe différentes classifications des argiles, la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, on distingue ainsi 4 groupes:

- **Minéraux à 7 Å:** Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1.

- **Minéraux à 10 Å:** Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1 .

- **Minéraux à 14 Å:** Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires.

- **Minéraux interstratifiés:** L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

### I.10 Le Ciment :

#### a) Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui mélangée avec de l'eau. Forme une pate faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est du à l'hydratation de certain composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

#### b) Les constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- |                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| - Calcaire.                 | - Pouzzolane naturelle. |
| - Laitier de haut fourneau. | - Schistes calcinés.    |
| - Cendres volantes.         | - Fumées de silice.     |
| - Fines calcaires.          |                         |

**c) Principe de fabrication des ciments courants :**

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases ;

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20%.

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

- Extraction - Concassage - Préparation du cru
- Cuisson - Refroidissement - Broyage
- Stockage, ensachage et expédition [17].

**d) Les types du ciment :**

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- Résistances mécaniques
- Résistance à une attaque physique ou chimique
- Mise en œuvre particulière.

Désignation	Type de ciment	Clinker %	Ajouts et teneurs en %	Matière secondaire
<b>CEM I</b>	Ciment portland	95 à 100 %		
<b>CEM II /A</b>	Ciment portland	80 à 94 %	L'un des Ajouts	6 à 20 %
<b>CEM II /B</b>	composé	65 à 79 %		21 à 35 %
<b>CEM III/A</b>	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	Laitier	35 à 65 %
<b>CEM III/B</b>		20 à 34 %		66 à 80 %
<b>CEM III/C</b>		5 à 19 %		81 à 95 %
<b>CEM IV/A</b>	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, Cendre ou	10 à 35 %
<b>CEM IV /B</b>		45 à 64 %	fumée silice	36 à 55 %
<b>CEM V/A</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	Laitier et cendre	18 à 30 %
<b>CEM V/B</b>		20 à 39 %		31 à 50 %

Tableau I. 4: Liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.

## I.11 La chaux :

### a) Définition :

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique.

Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

- **Les chaux aériennes** : fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.

- **La chaux vive (CaO)** : C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avide d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150° (réaction très exothermique).

- **La chaux éteinte (CaOH<sub>2</sub>)** : Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

**Les chaux hydrauliques** : Sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent [6].

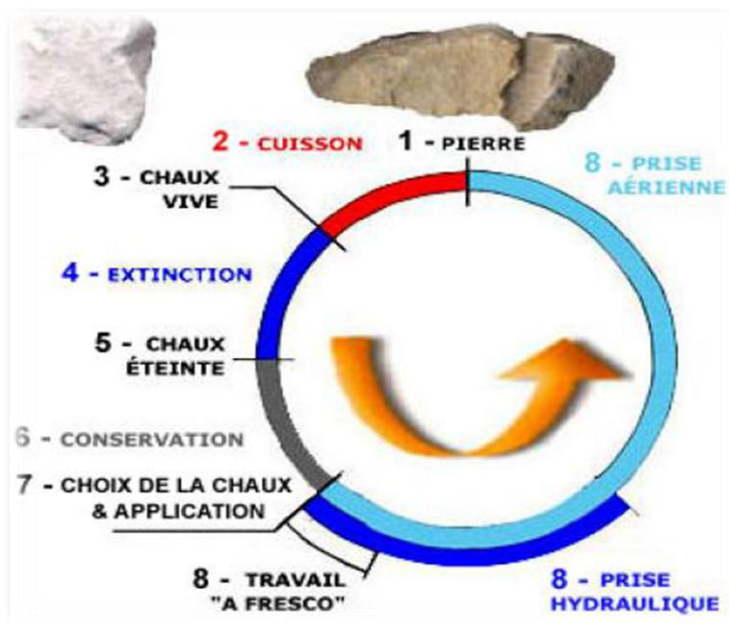


Figure I.31: Le cycle de chaux [3].

**b) Composition de la chaux :**

Analysées chimiquement, les chaux ont pour principaux composants, essentiellement des oxydes de calcium (CaO) et/ou des hydroxydes de calcium [Ca(OH)<sub>2</sub>], pouvant comprendre des quantités moindres de magnésium (MgO), d'hydroxyde de magnésium [Mg(OH)<sub>2</sub>], de silicium (SiO<sub>2</sub>), d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [3].

**c) Caractéristiques de la chaux :**

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que :

- Un pouvoir assainissant et désinfectant.
- Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant.
- Une participation à la respiration de l'ouvrage.
- Une élasticité.
- Une tenue dans le temps encore inégalité.
- Une absorption des CO<sub>2</sub> lors de la carbonisation [6].

**I.12 Recommandation pour l'utilisation des sols :**

D'une terre à l'autre, les propriétés sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des tractions granulaires qui les composent. C'est souvent la fraction granulaire dominante d'une terre qui caractérise ses propriétés fondamentales et régit son comportement. On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles 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. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction [18].

On observera cependant que la connaissance exhaustive des propriétés chimiques et physiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient en effet de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont [19]:

- la texture ou granularité;
- la plasticité;
- la compressibilité;
- la cohésion.

### **I.12.1 Texture ou Granularité :**

Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédimentométrique pour les fractions fines argileuses.

Les éléments tels que les graviers et les sables sont les éléments résistants du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement.

En plus, les réactions chimiques entre l'argile et la chaux (la réaction pouzzolanique) forment de nouveaux produits qui contribuent effectivement dans la valeur finale de la résistance d'une terre stabilisée à la chaux (et ciment). Les silts ont une fonction intermédiaire, moins nette.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et réfèrent aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante [19]:

- 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 : 0.002 mm - 0 mm

### **I.12.2 La plasticité :**

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité LP, l'indice de plasticité IP).

Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols.

Pour un sol à gros grains, ou pour un sol à grains fins contenant une faible teneur en argile, une faible augmentation de l'humidité au-dessus de la limite plastique détruit les forces d'attraction, qui fournissent la résistance au cisaillement. Cela signifie que la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquide est faible, et l'indice de plasticité est également faible. Alors que, pour un taux élevé d'argile dans un sol, il faut une importante quantité d'eau

pour détruire les forces d'attractions. Dans ce cas, l'indice de plasticité est élevé. Ainsi, l'indice de plasticité est un moyen indirect pour mesurer les quantités et les affinités de l'humidité de l'argile dans le sol.

Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent [2].

### **I.12.3 La compressibilité :**

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO).

Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée et moins l'eau pourra y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau. La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et, de ce fait, incompressibles [2].

### **I.12.4 La cohésion :**

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

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

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide [2].

## **I.13 Stabilisation :**

La stabilisation des sols au ciment et à la chaux a connu un progrès important durant les

trente dernières années. Ce progrès a été marqué par la connaissance des mécanismes des réactions entre terre – ciment et terre – chaux, par l'importance et la qualité des travaux au laboratoire et surtout par les expérimentations et les réalisations sur le terrain. Cette technique permet donc l'utilisation en couche de forme des chaussées. Dans le domaine de la construction en terre, le stabilisant le plus utilisé est le ciment [6].

### **I.13.1 Définition :**

La stabilisation est l'ensemble des procédés permettant d'améliorer les caractéristiques d'une terre, a fin de créer un matériau permettant la fabrication des blocs de terre comprimée [6].

### **I.13.2 objectif :**

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

- La réduction de volume de vide entre les particules.
- La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés.
- L'augmentation des liens entre les particules.
- Améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre (résistance à la compression, cohésion) en réduisant les vides entre les particules, en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules.
- Réduire la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules [6].

### **I.13.3 procédés :**

Trois procédés permettent de stabiliser la terre :

**a) Stabilisation mécanique :** le compactage de la terre modifie sa densité, sa résistance mécanique ainsi que sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.

**b) Stabilisation physique :** les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture, c'est-à-dire en mélangeant judicieusement des fractions de grains de taille différente.

**c) Stabilisation chimique :** d'autres matériaux ou des produits chimiques peuvent être ajoutés à la terre. Les liants (ciment et chaux éteinte) créent des liaisons mécaniquement résistantes même si le matériau se trouve ensuite en présence d'eau [6].







**I.13.4 Moyens de stabilisation :**

Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc.

Selon [18], il y a six modes de stabilisations :

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

Chaque stabilisant n’agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (tableau I.5) [13].

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

**Tableau I.5 : Moyens de stabilisation des terres remaniées**

**I.14 Stabilisation au ciment :**

**I.14.1 Généralités :**

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

publics que dans celui du bâtiment [19].

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %).

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

- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C<sub>3</sub>S et bélite C<sub>2</sub>S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, Ca(OH)<sub>2</sub>. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ( I<sub>p</sub> < 25 % ).

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

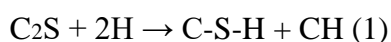
Réaction avec l'argile selon trois phases :

- L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile.
- Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
- Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation Persiste mais plus lente [6].

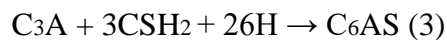
#### **I.14.2 Mécanisme de stabilisation :**

Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S) qui forment deux nouveaux composés: la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté

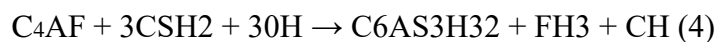
(C-S-H:3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O) :



L'hydratation des aluminates tricalciques (C<sub>3</sub>A) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



La phase ferrite (C<sub>4</sub>AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



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

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

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit [24] :

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

Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment [6].

**I.15 Stabilisation à la chaux :****I.15.1 Généralités :**

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

- La chaux vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de Calcium (CaO).
- La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO<sub>2</sub> de l'air.
- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.
- Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant IP > 17 et LL > 40.
- La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges. Le Roux a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme [6].

**I.16 Densification par compression :**

Le compactage est une opération qui s'accompagne d'une réduction du volume des vides dans un sol (figure I.32) donc une densité sèche plus importante. On constate, pour tous les matériaux, une relation très nette entre la densité sèche et la résistance mécanique.

Celle-ci est d'autant plus élevée que le matériau est compact. C'est ainsi que, pour une même composition et un même dosage, un béton est d'autant plus résistant qu'il est dense ; de même les pierres les plus denses ont les résistances mécaniques les plus élevées.

C'est également le cas pour les terres ; toutefois pour ces dernières, les densités que l'on peut obtenir demeurent relativement faibles [2].

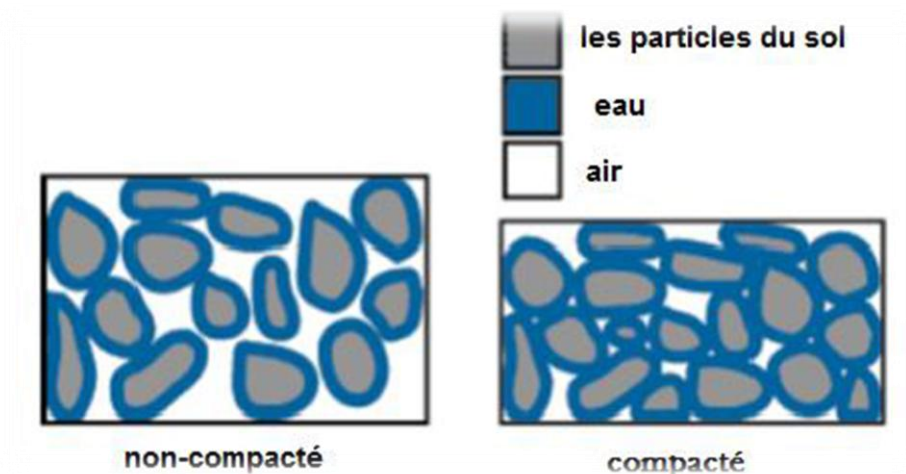


Figure I.32 : Effet du compactage sur les vides des sols  
(DeJong-Hughes, 2001).

La méthode de densification influe fortement sur la résistance finale du matériau .Il existe principalement quatre méthodes de compactage :

- La compression statique.
- La compression dynamique par vibration.
- La compression dynamique par impact.
- La compression par pétrissage [19].

### Conclusion :

A travers cette recherche bibliographique, nous avons montré le caractère ancien de la construction en terre et son importance dans le domaine de construction. Aussi, on a traité les différentes techniques de la construction.

On a constaté que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) comme stabilisants améliorent la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC.

- La compression de la brique joue un rôle important dans la résistance à la compression.

Donc on constate que pour tous les matériaux, une relation très nette entre la densité sèche et la résistance mécanique.

C'est à partir de cette conclusion qu'on a défini notre objectif de travail en choisissant le type d'argile adapté pour ces stabilisant.

**CHAPITRE II :**  
**«MATERIAUX DE L'ETUDE**  
**ET**  
**TECHNIQUES EXPERIMENTALES »**

## II.1 Introduction :

Cette partie décrit l'ensemble des méthodes et techniques utilisées dans le cadre de cette étude ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre. Ainsi, après les prélèvements des échantillons du site, on a Procédé identification, à la caractérisation physique, ainsi qu'à la caractérisation minéralogique, ensuite à la préparation des différents traitements, à leur Application sur les échantillons puis à la caractérisation mécanique des échantillons Traités .

Dans ce chapitre on présente les différents critères de sélection d'un matériau destiné à la confection de brique de terre comprimée (BTC) et stabilisée.

## II.2 Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont: La terre, le ciment, la chaux et l'eau de robinet.

### II.2.1 Origine de la terre :

La terre étudiée est extraite de différents sites de la région de la wilaya de M'sila (Algérie) : l'argile grise est extraite de la ville « Al-Rachana », l'argile verte est extraite de la ville «Mâadid » et l'argile rouge est extraite à partir de « Chaâba l'hamra » , il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

Nous avons utilisés trois types d'argile, argile n°1 « argile rouge ( $Arg_{rge}$ ) », argile n°2 « argile verte ( $Arg_{vrt}$ ) », argile n°3 « argile grise ( $Arg_{grs}$ ) ».



Figure II.1 :Argile n°1 $Arg_{rge}$

figure II.2 : Argile n°2  $Arg_{vrt}$

figure II.3 : Argile n°3  $Arg_{grs}$

### **II.2.2 Caractérisation et méthodes expérimentales :**

Les trois différentes matières premières, utilisées dans la fabrication des briques, ont été prélevées de trois différents sites. Le mode de prélèvement, de préparation et de traitement est commun pour les trois échantillons, pour pouvoir effectuer la comparaison entre eux. Ces derniers ont été caractérisés dans le but d'identifier et de déterminer leurs propriétés physiques, minéralogique et géotechniques. Les essais d'identification ont permis aussi la classification de ces échantillons, et de connaître leurs effets sur l'élaboration et la mise en œuvre des briques en terre crue.

#### **II.2.2.1 Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :**

La composition granulaire du sol est déterminée à travers l'analyse granulométrique selon les normes NF P 94-056. Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure II. 4).



**Figure II.4 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.**

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus (g)	Cumulés (%)	Tamisât (%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	543,6	543,6	27,18	72,82
0,315	568,8	1112,4	55,62	44,38
0,160	465,3	1577,7	78,88	21,12
0,08	240,5	1817,5	90,87	9,13
Fond	182,4	1999,9	99,99	0,01

Tableau II.1 : Analyse granulométrique pour le type d'argile *Arg<sub>grs</sub>* .

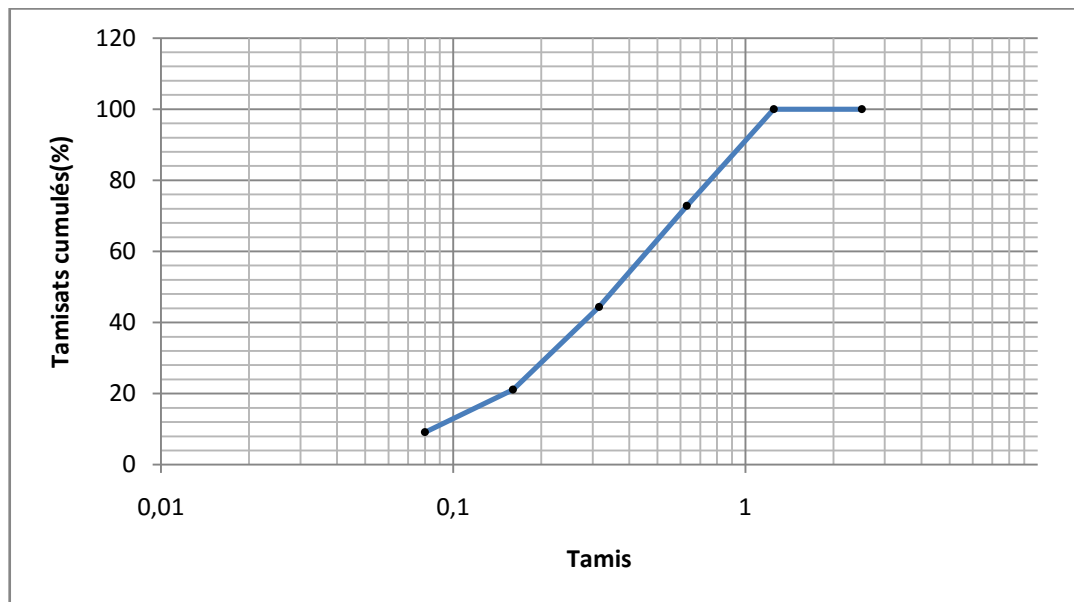


Figure II.5 : Courbe granulométrique d'argile *Arg<sub>grs</sub>* .

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus Cumulés (g)	Cumulés (%)	Tamisât (%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	438	438	21,9	78,1
0,315	532,8	970,8	48,54	51,46
0,160	601,8	1572,6	78,63	21,37
0,08	302,7	1875,3	93,76	6,24
Fond	124,3	1999,6	99,98	0,02

Tableau II.2 : Analyse granulométrique pour le type d'argile  $Arg_{rge}$ .

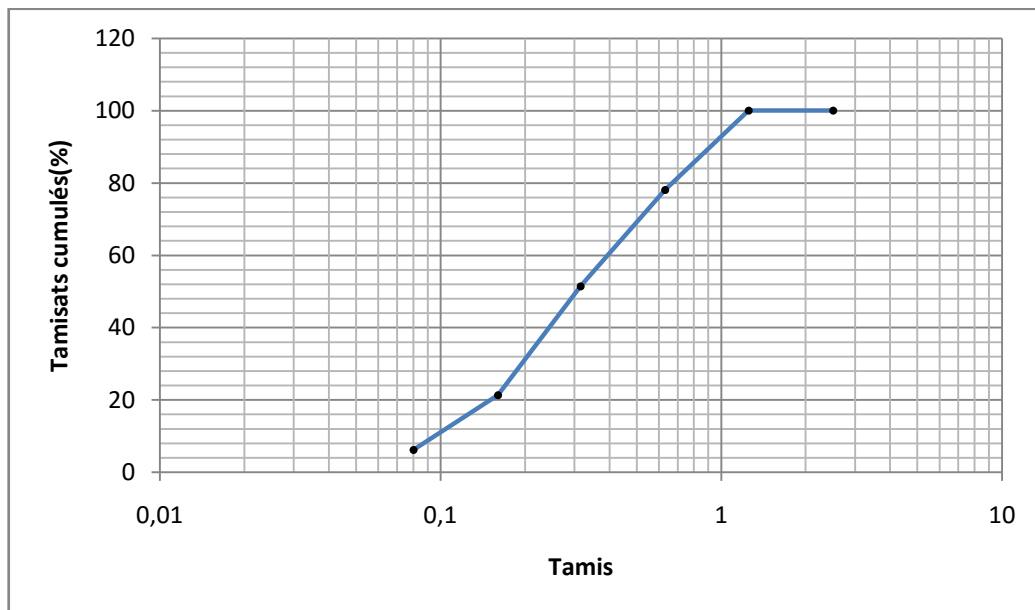
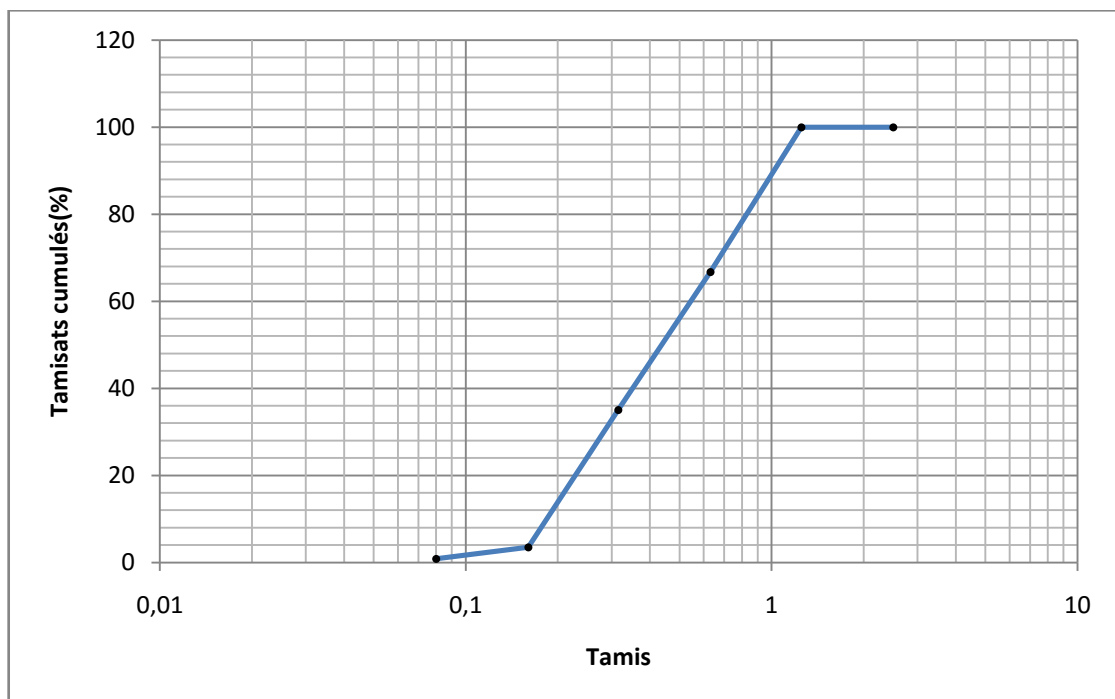


Figure II. 6 : Courbe granulométrique d'argile  $Arg_{rge}$ .

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus Cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât (%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	664,8	664,8	33,24	66,76
0,315	633,9	1298,7	64,93	35,07
0,160	630,8	1929,5	96,47	3,53
0,08	53,2	1982,7	99,13	0,87
Fond	16,8	1999,5	99,97	0,03

Tableau II.3 : Analyse granulométrique pour le type d'argile  $Arg_{vrt}$ .Figure II.7 : Courbe granulométrique d'argile  $Arg_{vrt}$ .

### II.2.2.2 Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051) :

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau présentant les limites de passage du sol d'un état à un autre : « la limite de liquidité et la limite de plasticité ».

La limite de plasticité ( $w_p$ ) est la teneur en eau correspondante au passage de l'état solide à l'état plastique. Cependant, la limite de liquidité ( $w_l$ ) présente le passage de l'état plastique à l'état liquide. Les figures II.9 et II.10 illustrent les essais d'identification de ces limites d'Atterberg.

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence  $I_p = w_l - w_p$  d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

$I_p$  : indice de plasticité : Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les Limites de liquidité et de plasticité (Figure II.8).

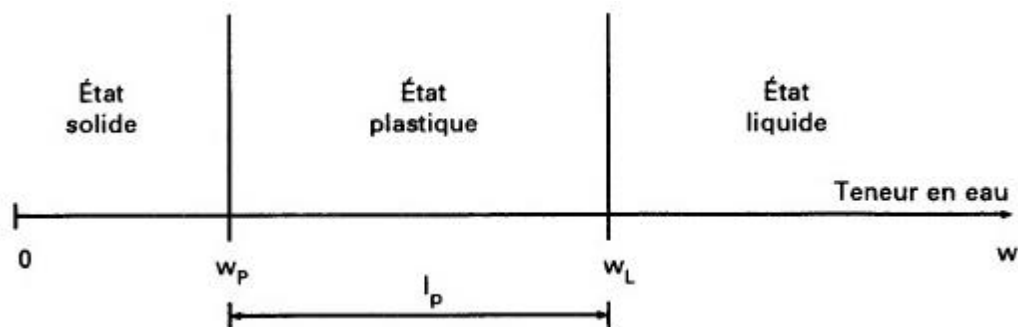


Figure II.8 : Présentation des limites d'Atterberg.



Figure II.9 : Limite de plasticité au rouleau Casagrande.



Figure II.10 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.

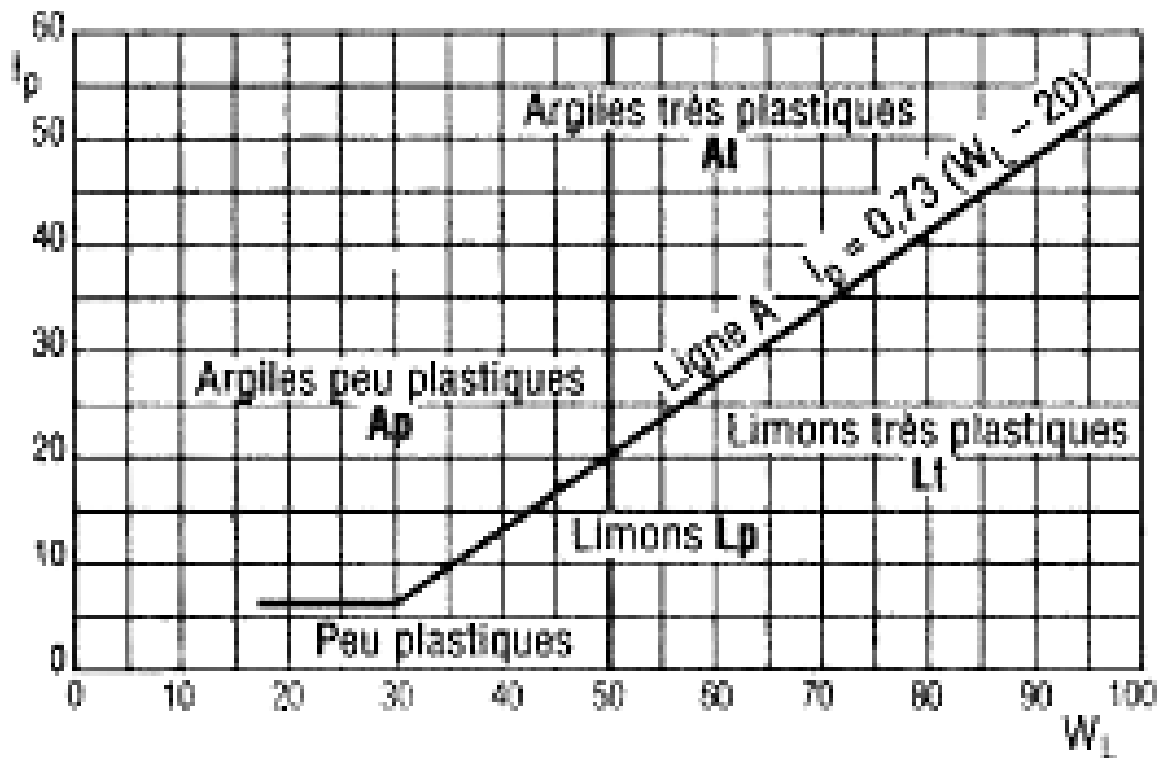


Figure II.11 : Diagramme de Casagrande

La limite d'Atterberg			
Les types d'argile	Limite de liquidité $W_L$ (%)	Limite de plasticité $W_P$ (%)	L'indice de plasticité $I_P$ (%)
Argile Grise	50,52	33,56	16,96
Argiles Rouge	24,08	18,74	5,34
Argiles verte	26,83	25,46	1,37

**Tableau II.4 : Les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 03 types des argiles.**

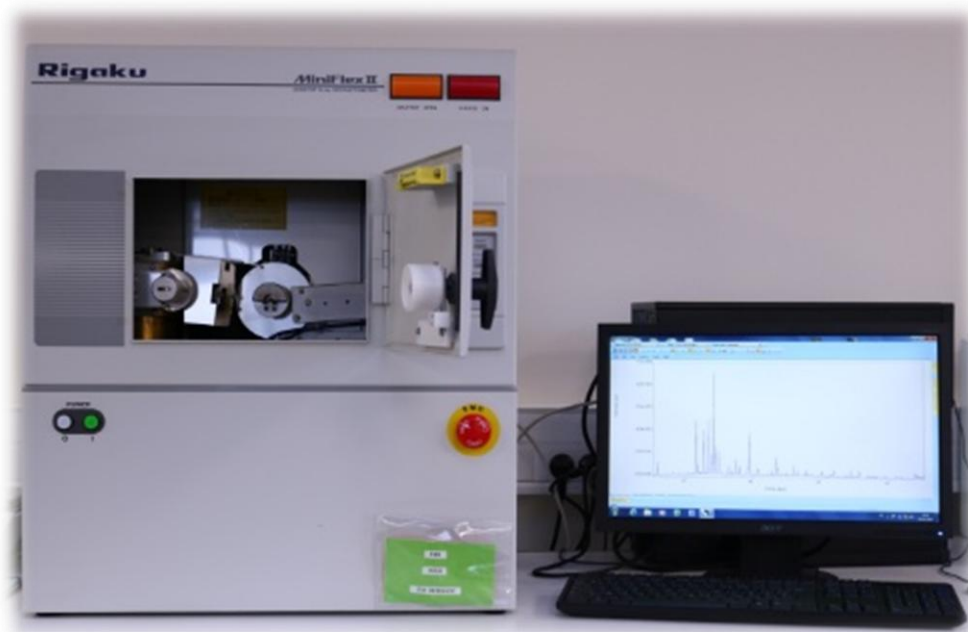
-D'après le diagramme de Casagrande l'argile grise est classée parmi les sols argileux très plastiques.

-D'après le diagramme de Casagrande l'argile rouge est classée parmi les sols Limons Peu plastiques.

-D'après le diagramme de Casagrande l'argile verte est classée parmi les sols Limons Peu plastiques.

### II.2.2.3 Composition minéralogique (DRX):

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de la diffraction des rayons X, qui permet d'identifier les différentes phases minérales cristallisées présentes dans l'échantillon. L'appareillage utilisé est le diffractomètre Figure (II.12).



**Figure II.12 : appareillage Diffractomètre.**

Les diffractogrammes des différents échantillons sont présentés dans les tableaux (II.5.a et II.5.b) suivants :

Type d'argile	R_Wp	calcite	dolomite	quartz	pyrite	illite
	%	%	%	%	%	%
<b>Argile grise</b>	7,27	21,79	4,99	27,32	0,42	24,04
<b>Argile verte</b>	8,04	16,83	2,42	25,73	0,14	25,97
<b>Argile rouge</b>	7,05	55,24	10,95	7,9	0,26	18,72

**Tableau II.5.a : Composition minéralogique des échantillons (%)**

Type d'argile	chlorite	kaolinite	albite	CO2_XRD	PAF
	%	%	%	%	%
<b>Argile grise</b>	5,25	10,11	6,07	11,96	18,1
<b>Argile verte</b>	4,28	17,41	7,21	8,56	17,17
<b>Argile rouge</b>	5,31	1,25	0,37	29,52	27

**Tableau II.5.b : Composition minéralogique des échantillons (%)**

Avec PAF : Perte au Feu.

Le diffractogramme de l'échantillon de l'argile grise montre qu'il est essentiellement de Quartz, d'illite et de calcite, Cependant la composition minéralogique de l'échantillon de l'argile verte contient l'illite, le Quartz et la kaolinite.

L'échantillon de l'argile rouge est constitué de forte proportion de calcite.

### II.2.3 Ciment :

Le ciment utilisé est le ciment de la cimenterie Lafarge de hammam dalâa (wilaya de M'Sila) « MOKAOUEM » CRS et « MATINE » CPJ-CEM II 42.5



**Figure II.13 : Les deux types de ciment utilisé.**

### II.2.4 La chaux :

La chaux est un matériau écologique utilisé aussi bien pour la maçonnerie que pour la décoration. Remplacé depuis le XX<sup>ème</sup> siècle par le ciment, la chaux suscite un regain d'intérêt en raison de ses qualités intrinsèques qui en font l'élément incontournable d'un habitat sain.

Dans cette étude on a utilisé la chaux broyée de la wilaya de Saida (SARL.BMSD) (Algérie).

La composition chimique de la chaux, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le Tableau II .6 .

Caractéristiques de base	La fiche technique de la chaux
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO (%)	>73.3
MgO (%)	<0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<1.5
SiO <sub>2</sub> (%)	<2.5
SO <sub>3</sub> (%)	<0.5
Na <sub>2</sub> O (%)	0.4-0.5
CO <sub>2</sub> (%)	<5
CaCO <sub>3</sub> (%)	<10
Densité spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	2
Plus de 90 µm (%)	<10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	<1
Densité apparente (g/l)	600-900

Tableau II.6 : Fiche technique des propriétés physique et chimiques de la chaux de Saida.

**II.2.5 L'eau de gâchage :**

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau potable de laboratoire de développement des Géomatériaux Université de M'sila.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, les résultats des caractérisations physique, minéralogique et géotechnique des trois échantillons de sols ont été présentés.

Les différents essais d'identification ont permis de déterminer les propriétés de chacune de ces matières premières, qui sont utilisées principalement dans l'industrie de la brique de terre crue. En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet de bien comprendre leur comportement lors de la production des briques (façonnage, séchage).

L'argile grise est une argile très plastique, par contre les autres types d'argiles (rouge et verte) sont des argiles peu plastiques.

On remarque que l'argile grise et l'argile verte se convergent en leur pourcentage de la composition minérale.

Nous avons utilisé deux types de ciment CRS et CEM II 42.5 du groupe Lafarge. Les essais d'identification sont complémentaires, ils permettent d'expliquer et d'analyser les résultats obtenus lors de notre étude.

C'est une étape préalable pour la suite des travaux de mémoire.

**CHAPITRE III :**  
**« METHODE DES**  
**PLANS D'EXPERIENCES »**

### III.1 Introduction :

Les plans d'expérience sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité [25].

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles.

### III.2 Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum [26].

### III.3 Les différents types de facteurs :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens [26].

#### *a- facteurs continus :*

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

#### *b- Facteurs discrets :*

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

***c- Facteurs ordonnables :***

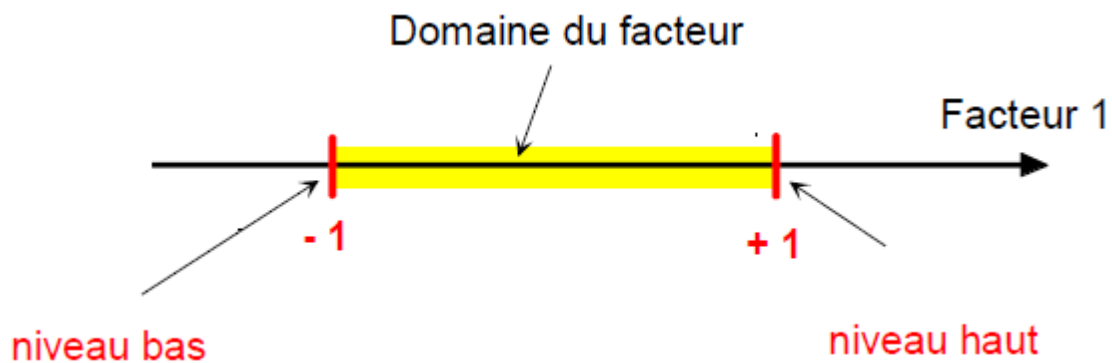
Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

***d- Facteurs booléens :***

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

**III.4 Notion d'espace expérimental :**

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure III.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.



**Figure III.1 : Le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur**

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ .

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé *l'espace expérimental* (Figure III.2).

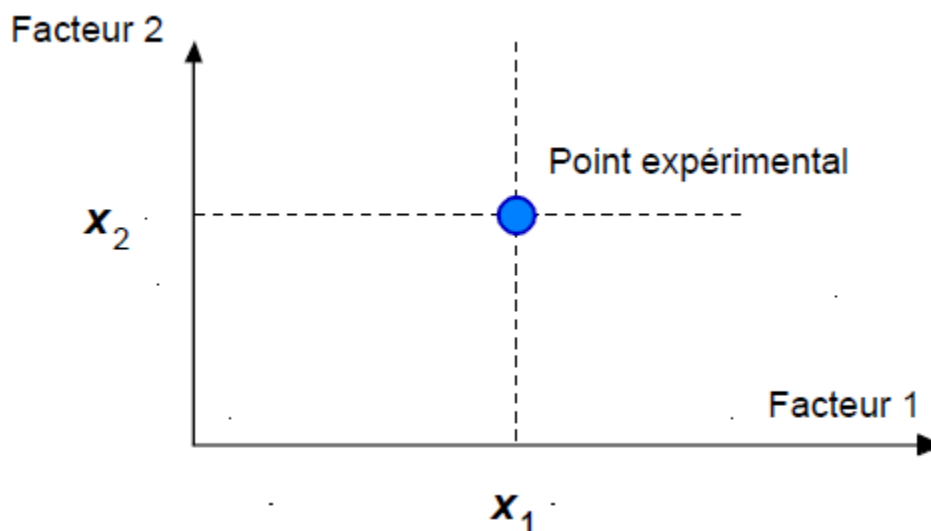


Figure III.2 : L'espace expérimental d'un facteur.

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure III.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

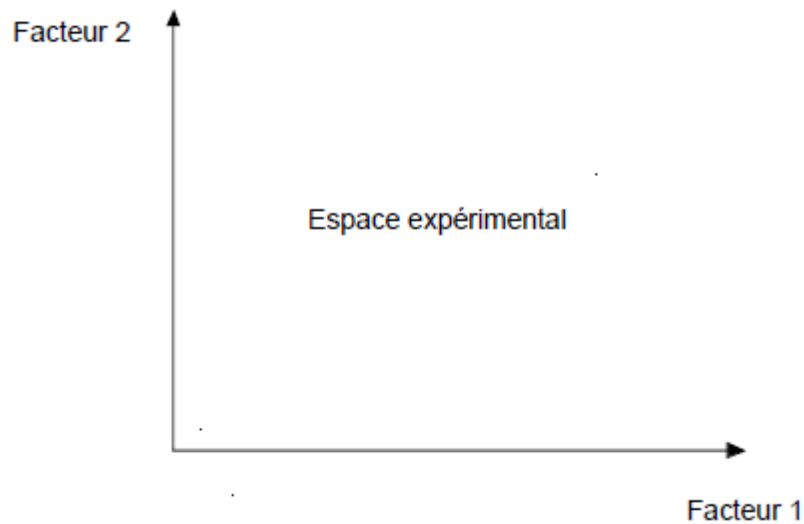


Figure III.3 : Les points expérimentaux dans un espace expérimental.

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure III.4). Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude [26].

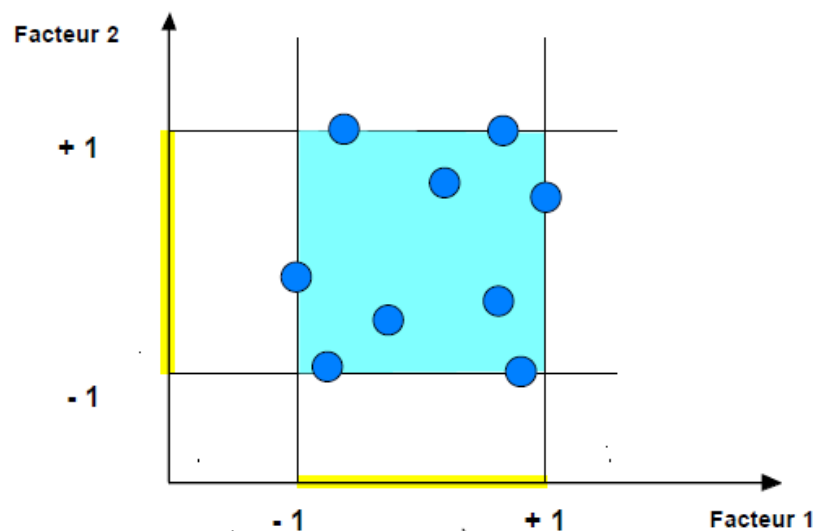


Figure III.4 : Les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

### III.5 Notion de surface de réponse :

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $y$  est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure III.5).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences [26].

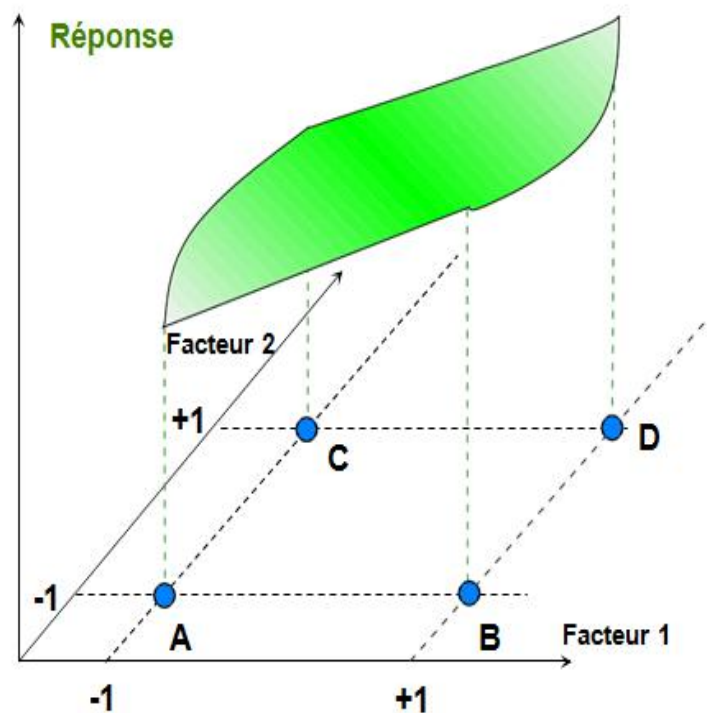


Figure III.5 : L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.

### III.6 Notion de modélisation mathématique :

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + L + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij \dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (1)$$

- $y$  est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- $x_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.
- L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

Ce modèle est appelé "*modèle postulé*" ou "*modèle a priori*" [26].

### III.7 Le modèle de l'expérimentateur:

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit.

Le premier complément est le "*manque d'ajustement*". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (*lack of fit* en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée  $e$ . Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + L + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij \dots z} x_i x_j \dots x_z + e \quad (2)$$

$e$  est le vecteur des écarts.

### III.8 Logiciel utilisé :

#### III.8.1 Présentation de logiciel « Minitab » :

« MINITAB » est un logiciel statistique mis au point, à l'origine, par le Département de Statistique de l'Université de Pennsylvanie (U.S.A.). Il est particulièrement bien adapté à l'analyse statistique de petits tableaux de données bien structurés : statistique descriptive, analyse de la variance, méthodes relatives à la corrélation et à la régression simple et multiple, séries chronologiques, tests d'indépendance, méthodes non paramétriques, analyse en composantes principales, analyse discriminante, Contrôle statistique de la qualité, plans expérimentaux, etc.

Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

#### III.8.1.1 Diagramme de Pareto :

**Diagramme de Pareto** : c'est un graphique représentant l'importance de différentes causes d'un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation.

#### III.8.1.2 Graphique des effets :

Un graphique des effets principaux permet d'examiner les différences entre les moyennes des niveaux d'un ou plusieurs facteurs. On parle d'effet principal lorsque les différents niveaux d'un facteur ont une incidence sur la réponse. Un graphique des effets principaux affiche la moyenne de la réponse pour chaque niveau de facteur connecté par une ligne.

#### III.8.1.3 Graphique des interactions :

La fonction Diagramme des interactions permet de déterminer l'influence d'un facteur de catégorie sur la relation entre un second facteur de catégorie et une réponse continue. Ce diagramme affiche les moyennes correspondant aux niveaux d'un facteur sur l'axe des X, ainsi qu'une courbe distincte pour chaque niveau d'un autre facteur.

**Conclusion :**

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles.

**Chapitre IV**  
**« ELABORATION D'UN MODELE**  
**EXPERIMENTAL**  
**DES BTCS »**

### IV.1 Introduction :

D'après la détermination des caractéristiques des différents matériaux utilisés, nous allons présenter dans ce chapitre les essais réalisées sur les briques de terre comprimées et stabilisées (BTCS) par ciment et par la chaux.

### IV.2 Confection des blocs :

#### IV.2.1 Mélanges :

Dans le but d'améliorer la résistance des matériaux locaux utilisés dans les constructions, plusieurs traitements ont vu le jour. Il s'agit par exemple des traitements des argiles par le ciment, par la chaux. Ces techniques d'amélioration de la résistance des matériaux locaux font appel à la technique de mélange afin d'homogénéiser et de bien répartir le traitement dans l'ensemble du matériau.

#### IV.2.2 Préparation des mélanges :

##### IV.2.2.1 Etapes de préparation :

Les étapes suivantes :

**1-On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux :** argile, ciment, chaux, et eau.

**2- Matériel spécifique :** Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule cylindrique pour une hauteur de 42 cm et avec diamètre interne 7 cm et 9 cm pour le diamètre extérieur, il est en acier trempé.

Le moule est muni des deux pistons pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange. Ce moule a une capacité de charge de plus de 400 KN.

Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la (figure IV.1).

**3- Préparation des moules :** après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile le moule est prêt pour l'utilisation.

**4- le malaxage :** L'opération est exécutée comme suit:

\*On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment ou la chaux, dans le malaxeur (figure IV.2 et figure 3) et on malaxe le mélange à sec durant 40 à 60 secondes

\*On ajoute une quantité d'eau, puis on malaxe pendant 120 à 180 seconde jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

\*Le malaxage et la préparation du moule sont des opérations importantes dans la fabrication de la BTC. La répartition du stabilisant doit être homogène pour que son effet soit uniforme pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage.

**5- Le moulage des éprouvettes :** cette opération est exécutée à l'aide d'une presse manuelle du laboratoire de développement Géomatériaux (sous pression estimée à 300 KN) (figure IV.6).

**6- Compactage des mélanges :** Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse manuelle : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble – moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué une seule contrainte de compactage (75 Mpa), tout en respectant le programme présenté dans le tableau.

**7- le démoulage des éprouvettes :** exécuté à l'aide d'un extracteur mécanique (figure IV.5).

Le poids du mélange humide pour chaque éprouvette est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 701 g.

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques des dimensions (7\*7.5) cm<sup>3</sup> (figure IV.7).

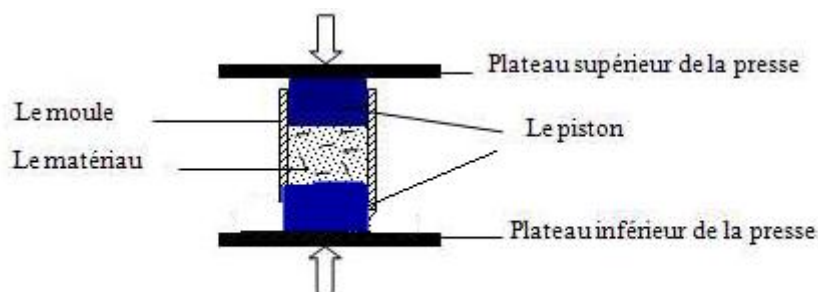


Figure IV.1 : Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTCS



Figure IV.2 : Le malaxeur utilisé.



Figure IV.3 : Les matériaux.



Figure IV.4 : Le moule utilisé.



Figure IV.5 : Extracteur mécanique.



**Figure IV.6 : Presse manuelle du laboratoire de développement Géo matériaux, Université de M'sila.**



**Figure IV.7 : Des éprouvettes confectionnées.**

**IV.2.2.2 Préparation du mélange :**

Nous avons fait les études à l'aide d'un logiciel « Minitab », on a choisi les facteurs présenté dans les tableaux ci-dessous.

Les mélanges sont préparés selon la méthodologie des plans d'expérience :

Facteurs	
<b>Type de mélange</b>	-M1= 75ARGrs/25ARGrge -M2= 50ARGrs/50ARGrge - M3= 75ARGvrt/25ARGrge - M4= 50ARGvrt/50ARGrge
<b>(%) d'eau</b>	5% 8% 10%
<b>Type de stabilisant</b>	Type 1 : CRS Type 2 : Matine Type 3 : chaux
<b>(%) de stabilisant</b>	6% 10%

**Tableau IV.1 : Les facteurs choisis.**

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le tableau IV. 2:

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2 (%) d'eau	Facteur 3 Type de stabilisant	Facteur 4 (%) de stabilisant
1	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	10
2	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	CRS	10
3	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	10
4	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	CRS	10
5	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	6
6	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	CRS	6
7	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	6
8	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	CRS	6
9	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	10
10	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	10
11	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	10
12	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	10
13	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	6
14	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	6
15	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	6
16	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	6
17	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Chaux	10
18	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	10
19	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	10
20	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	6
21	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	6
22	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	5	CRS	10
23	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	10	CRS	10
24	M4= 50ARGvrt/50ARGrge	5	CRS	10

Tableau IV.2 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

### IV.3 La cure des éprouvettes :

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge.

Après le démoulage, les éprouvettes sont introduites dans une étuve climatique à 20 °C avec humidité de 90% pendant 28 jours.



Figure IV.8 : L'étuve utilisée pour la cure (du laboratoire de développement Géomatériaux Université de M' sila).

### IV.4 Essai de compression (la norme P 18-406) :

L'essai de compression est réalisé suivant la norme P 18-406.  $\sigma_c = \mathbf{F/S}$

**F** : la charge appliquée en KN.

**S** : section transversale de l'éprouvette ( $S = a * a$ ).



Figure IV.9: Presse hydraulique pour l'essai de compression.

#### IV.5 Essai de flexion :

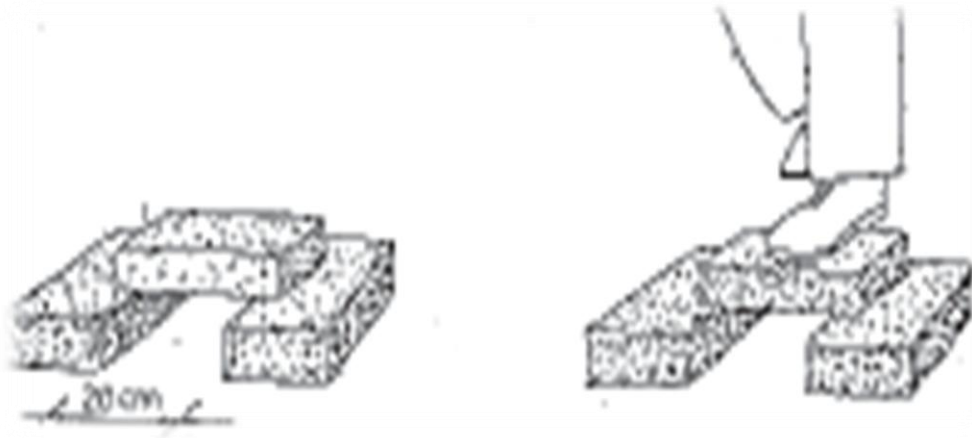
L'essai de flexion est réalisé suivant les recommandations du « CNERIB ».

##### Principe :

Essai de flexion (pour un bloc parallélépipède de 23x11x6,5 cm, après 28 jours) placer le bloc à tester sur deux blocs alignés sur terre et séparés de 20 cm.

Placer ensuite une baguette de bois de 2x2 cm au milieu de la grande face supérieure du bloc, comme indiqué ci-dessous et faire monter une personne d'approximativement 70 Kg de poids.

Si le bloc résiste sans se casser, il est apte pour la construction.



**Figure IV.10 : L'essai de flexion d'après « CNERIB »**



**Figure IV.11 : Briques de terre comprimées et stabilisées.**

**Conclusion :**

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le ciment et la chaux

A partir ces argiles et ce moule on peut réaliser plusieurs mélanges pour fabriquer de BTCS.

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

**CHAPITE V :**  
**« RESULTATS**  
**ET**  
**INTERPRETATIONS »**

**V.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, après avoir réalisé toutes les formulations nécessaires de tous les mélanges des éprouvettes. On va présenter les résultats et donner les interprétations convenables pour les valeurs obtenues par les différents essais.

**V.2 Résultats des essais :****V.2.1 les masses volumiques des BTC :**

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2 (%) d'eau	Facteur 3 Type de stabilisant	Facteur 4 (%) de stabilisant	La masse volumique $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	10	2419
2	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	CRS	10	2316
3	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	10	2410
4	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	CRS	10	2349
5	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	6	2418
6	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	CRS	6	2356
7	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	6	2412
8	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	CRS	6	2414
9	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	10	2421
10	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	10	2369
11	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	10	2420
12	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	10	2380
13	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	6	2424
14	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	6	2365
15	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	6	2422
16	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	6	2386
17	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Chaux	10	2332
18	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	10	2295
19	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	10	2296

20	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	6	2287
21	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	6	2293
22	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	5	CRS	10	2418
23	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	10	CRS	10	2327
24	M4= 50ARGvrt/50ARGrge	5	CRS	10	2387

Tableau V.1 : Les résultats des masses volumiques des BTC.

## V.2.2 les résistances mécaniques à 7 j des BTC :

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2 (%) d'eau	Facteur 3 Type de stabilisant	Facteur 4 (%) de stabilisant	La résistance mécanique à 7j (Mpa)
1	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	10	14,34
2	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	CRS	10	7,36
3	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	10	17,71
4	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	CRS	10	8,95
5	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	6	12,41
6	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	CRS	6	7,35
7	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	6	12
8	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	CRS	6	12,06
9	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	10	18,97
10	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	10	12,82
11	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	10	16,91
12	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	10	12,08
13	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	6	13,01
14	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	6	9,67
15	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	6	13,76
16	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	6	10,22
17	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Chaux	10	11,44

18	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	10	8,12
19	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	10	7,61
20	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	Chaux	6	(écrasé à 28j)
21	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	Chaux	6	5,99
22	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	5	CRS	10	(écrasé à 28j)
23	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	10	CRS	10	(écrasé à 28j)
24	M4= 50ARGvrt/50ARGrge	5	CRS	10	(écrasé à 28j)

**Tableau V.2 : Les résultats des résistances mécaniques à 7j des BTC.**

### V.2.3 les résistances mécaniques à 28 j des BTC :

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2 (%) d'eau	Facteur 3 Type de stabilisant	Facteur 4 (%) de stabilisant	La résistance mécanique à 28j (Mpa)
1	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	10	18,61
2	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	10	CRS	10	13,74
3	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	10	20,69
4	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	10	CRS	10	14,29
5	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	CRS	6	13,64
6	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	CRS	6	9,89
7	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	CRS	6	15,53
8	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	CRS	6	15,86
9	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	10	21,92
10	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	10	15,08
11	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	5	Matine	10	21,14
12	M2= 50ARGgrs/50ARGrge	8	Matine	10	18,14
13	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	5	Matine	6	15,39
14	M1= 75ARGgrs/25ARGrge	8	Matine	6	10,91

15	M2= 50ARGrs/50ARGrge	5	Matine	6	(écrasé à 7jours)
16	M2= 50ARGrs/50ARGrge	8	Matine	6	13,61
17	M1= 75ARGrs/25ARGrge	5	Chaux	10	10,96
18	M1= 75ARGrs/25ARGrge	10	Chaux	10	(écrasé à 7jours)
19	M2= 50ARGrs/50ARGrge	10	Chaux	10	10,18
20	M1= 75ARGrs/25ARGrge	10	Chaux	6	8,40
21	M2= 50ARGrs/50ARGrge	10	Chaux	6	10,32
22	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	5	CRS	10	15,06
23	M3= 75ARGvrt/25ARGrge	10	CRS	10	13,71
24	M4= 50ARGvrt/50ARGrge	5	CRS	10	16,39

Tableau V.3 : Les résultats des résistances mécaniques à 28j des BTC.

V.2.4 les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :

V.2.4.1 diagramme de Perto des effets pour la masse volumique :

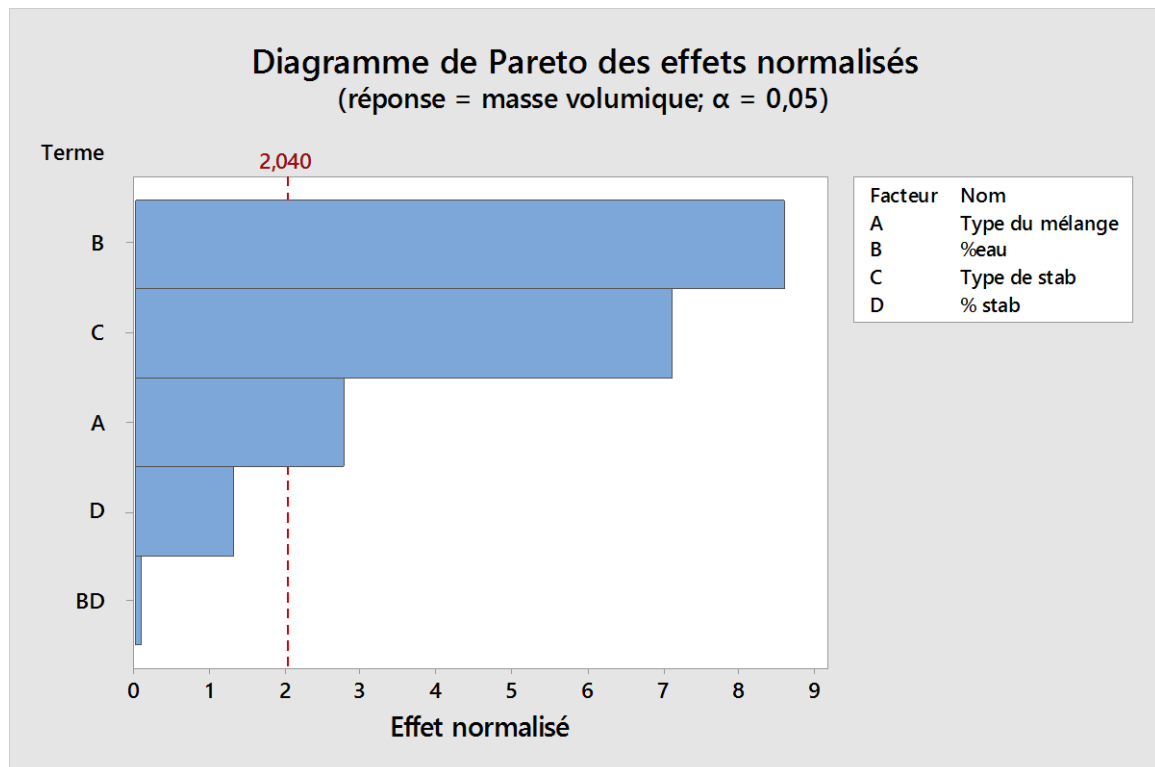
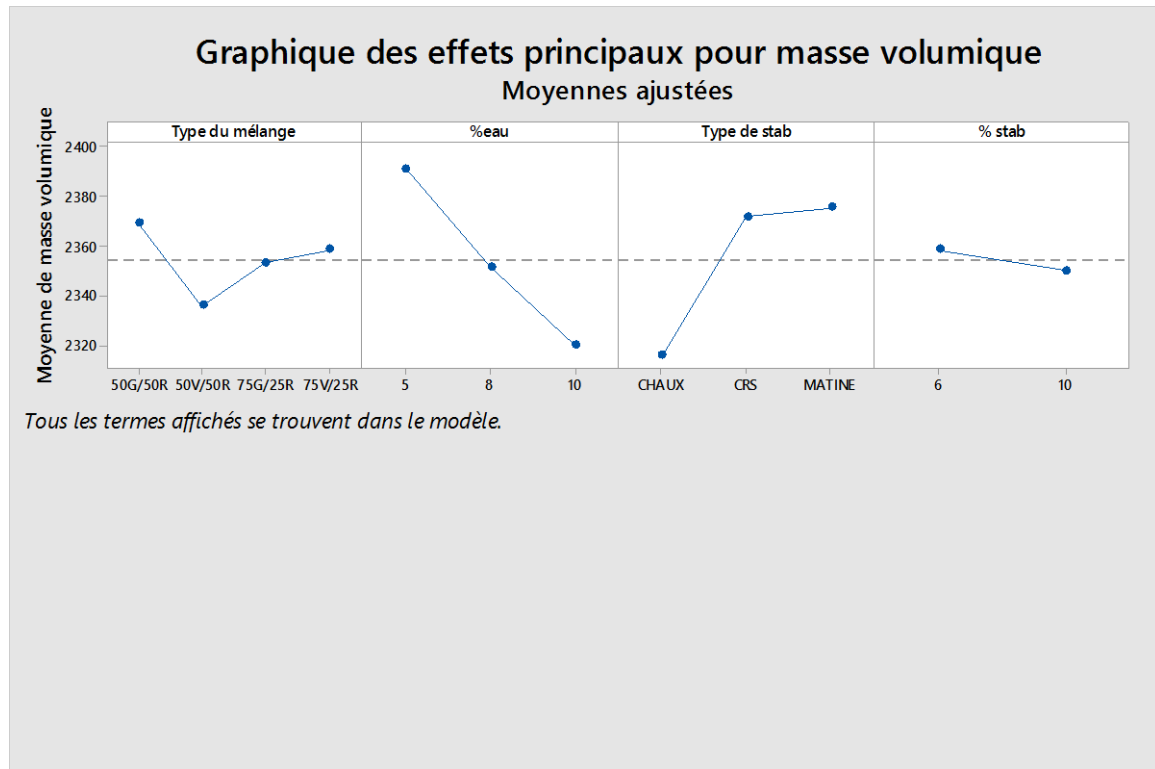


Figure V.1 : Diagramme des effets pour la masse volumique.

Ce graphe montre que les facteurs qui influents sur la masse volumique sont :

- le pourcentage d'eau (8,60).
- le type de stabilisant (7,12).
- le type de mélange (2,76).

#### V.2.4.2 Les effets principaux pour la masse volumique :



**Figure V.2 : Graphique des effets principaux pour la masse volumique.**

Ce graphe nous donne l'effet de chaque constituant sur la masse volumique :

- Parmi les types de mélange présentés ci-dessus le type (50G/50R) donne le meilleur résultat de la masse volumique vis-à-vis des autres types de mélange.
- Tout en augmentant le pourcentage d'eau la masse volumique diminue.
- Les types de stabilisants « CRS » et « MATINE » ont présentés des valeurs approchés de masse volumique alors que la chaux à présenté la valeur défavorable.
- D'après le graphe le pourcentage de stabilisant influe légèrement sur la masse volumique. Alors que pour l'utilisation de le stabilisant soit « MATINE » ou bien « CRS » aussi nous donne une masse volumique élevée ; par contre l'augmentation de le pourcentage d'eau nous donne une faible masse volumique, et pour le pourcentage de stabilisant presque nous donne aucun effet.

## V.2.4.3 Interactions des facteurs :

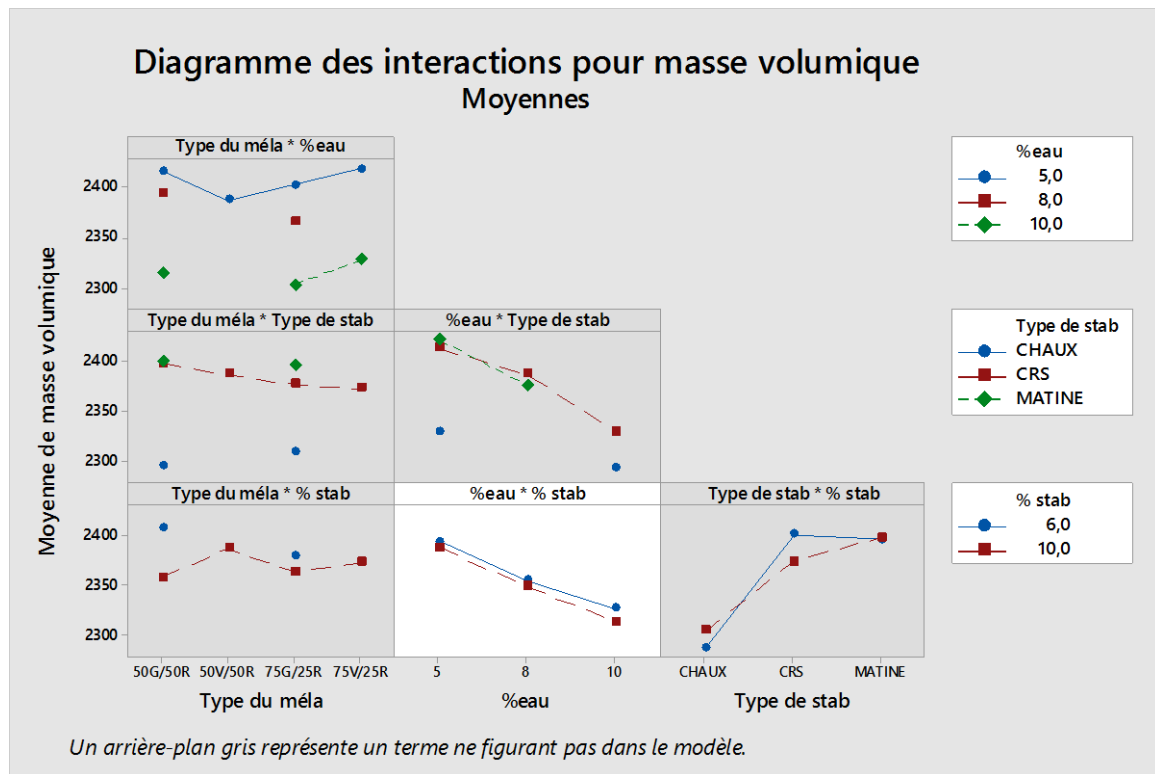


Figure V.3 : Diagramme des interactions entre les constituants pour la masse volumique.

- Tous les mélanges réalisés avec (5%) d'eau donnent la meilleure masse volumique (environ  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
- En plus lorsque on utilise un pourcentage d'eau égale à (8%) les mélanges (50G/50R) et (75G/25R) donne aussi un meilleur résultat proche de  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Les mélanges avec (10%) d'eau ont une masse volumique acceptable supérieur à  $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Les mélanges réalisés avec « MATINE » et « CRS » donnent un meilleur résultat ( $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) par rapport au mélange avec la chaux ( $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
- La meilleure valeur de masse volumique est obtenue avec (5%) d'eau et les stabilisant « Matine » ou « CRS ».
- Avec (6%) ou (10%) de stabilisant on obtient une masse volumique supérieure à  $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- La meilleure valeur de masse volumique est obtenue avec (5%) d'eau et quelque soit le pourcentage de stabilisant (6% ou 10%).

- La meilleure valeur de masse volumique est obtenue avec le stabilisant « Matine » ou « CRS ».

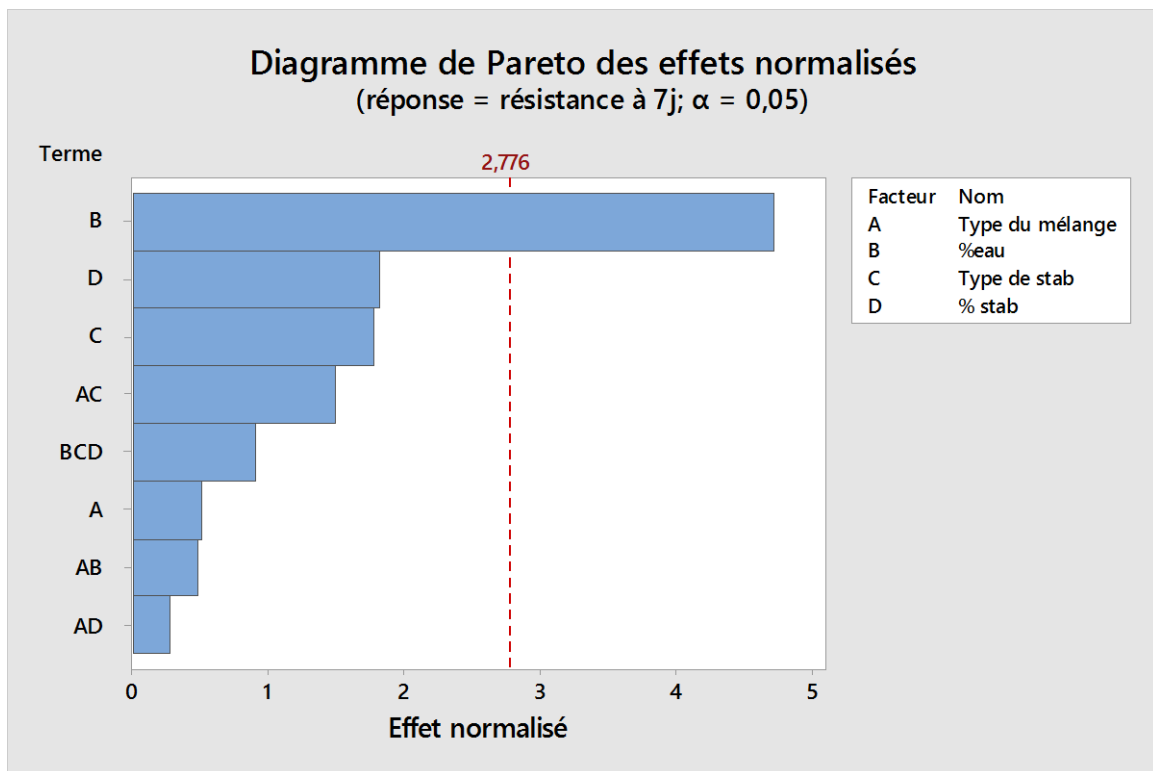
**\*Equation de Modélisation :**

$$\begin{aligned}
 \text{masse volumique} = & 2354,40 + 14,88 \text{ Type du mélange}_{50G/50R} - 18,1 \text{ Type du mélange}_{50V/50R} \\
 & - 1,10 \text{ Type du mélange}_{75G/25R} + 4,31 \text{ Type du mélange}_{75V/25R} \\
 & + 36,62 \% \text{eau}_{5} - 2,50 \% \text{eau}_{8} - 34,12 \% \text{eau}_{10} - 38,51 \text{ Type de stab}_{CHAUX} \\
 & + 17,33 \text{ Type de stab}_{CRS} + 21,17 \text{ Type de stab}_{MATINE} + 4,26 \% \text{stab}_{6} \\
 & - 4,26 \% \text{stab}_{10} - 1,01 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{5 6} + 1,01 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{5 10} \\
 & - 1,05 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{8 6} + 1,05 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{8 10} + 2,06 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{10 6} \\
 & - 2,06 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{10 10}
 \end{aligned}$$

**Conclusion :**

On peut obtenir la meilleur valeur de masse volumique lorsque on utilise le stabilisant « Matine » ou « CRS » avec (5%) d'eau et n'importe quelle pourcentage de stabilisant  
Tous les mélanges sont bons.

**V.2.4.4 Diagramme de Perto des effets pour la résistance à 7 jours :**

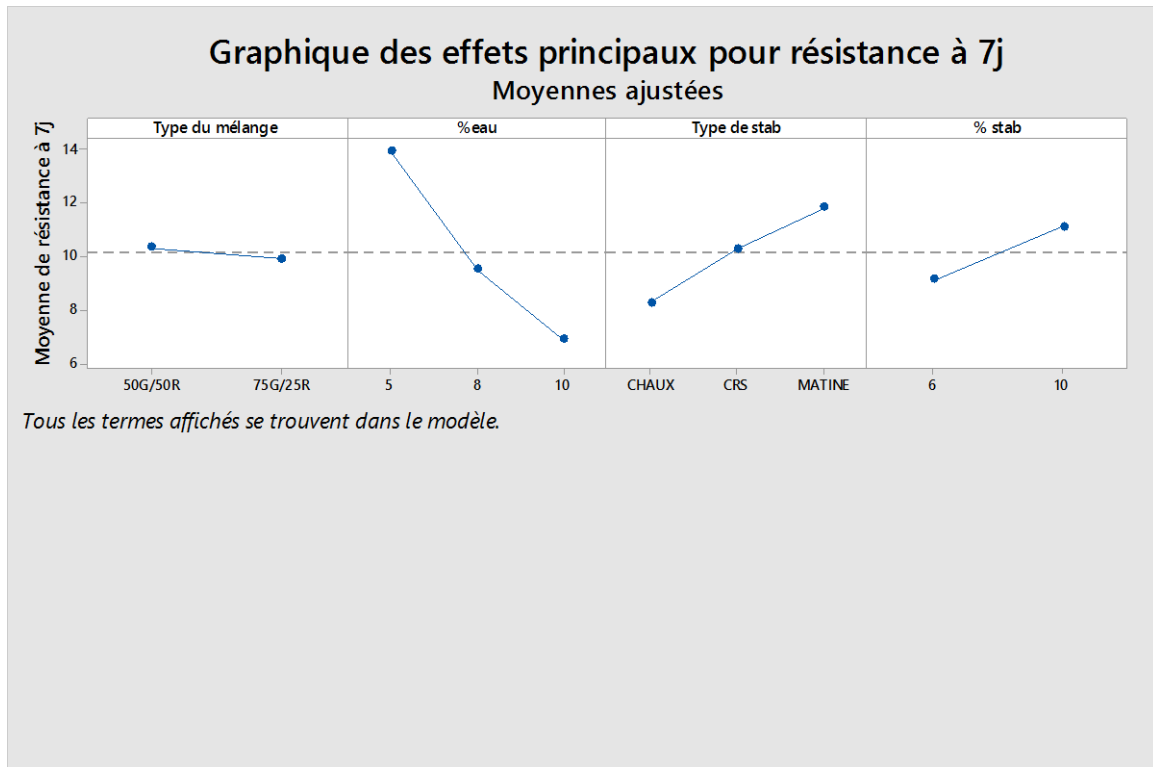


**Figure V.4 : Diagramme des effets pour la résistance à 7 jours.**

Ce graphe montre que le facteur qui a beaucoup d'effet sur la résistance à 7jours est :

- Le pourcentage d'eau (4,72).

## V.2.4.5 Les effets principaux pour la résistance à 7 jours :



**Figure V.5 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 7 jours.**

Ce graphe nous donne l'effet de chaque constituant sur la résistance à la compression (à 7 jours) :

- Le type de mélange (50G/50R) ou (75G/25R) d'après le diagramme montre que la résistance à 7 jours est légèrement rapprochée.
- Une fois le (%) d'eau diminue la résistance augmente.
- Le stabilisant « MATINE » est le plus influent sur la résistance à 7 jours par rapport à la chaux et « CRS ».
- Au fur et à mesure le (%) de stabilisant augmente la résistance est augmentée.

V.2.4.6 Interactions des facteurs :

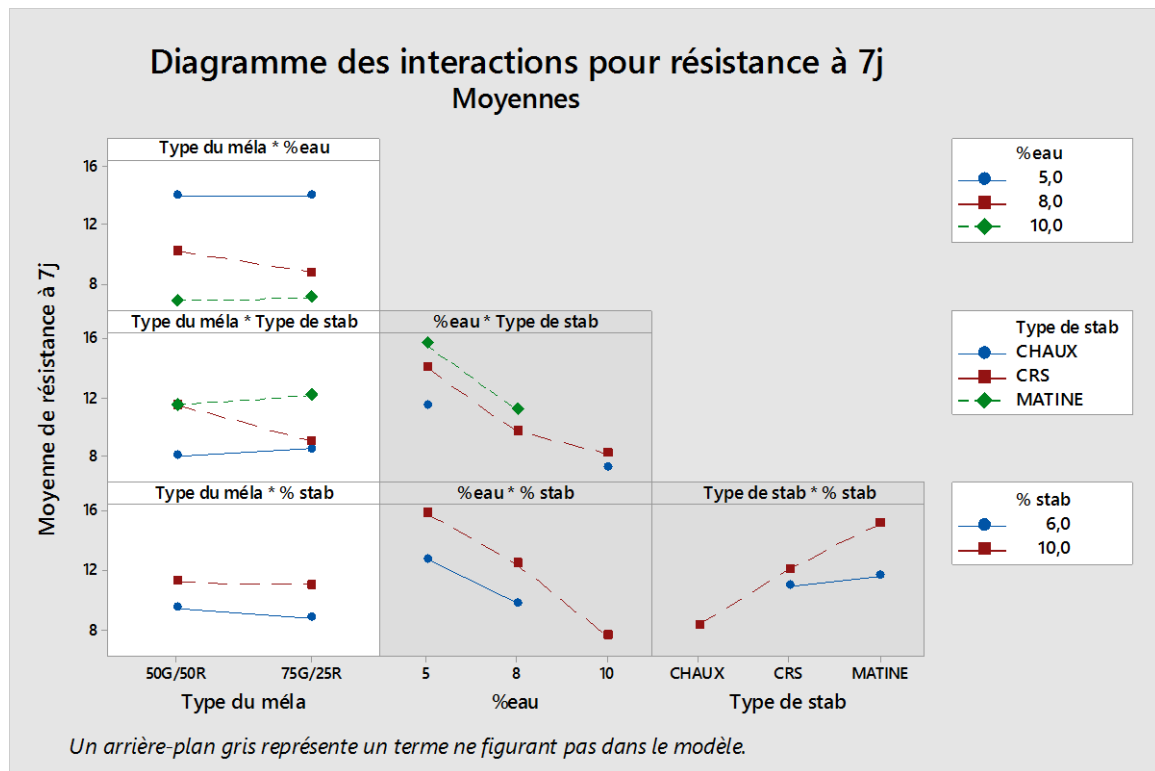


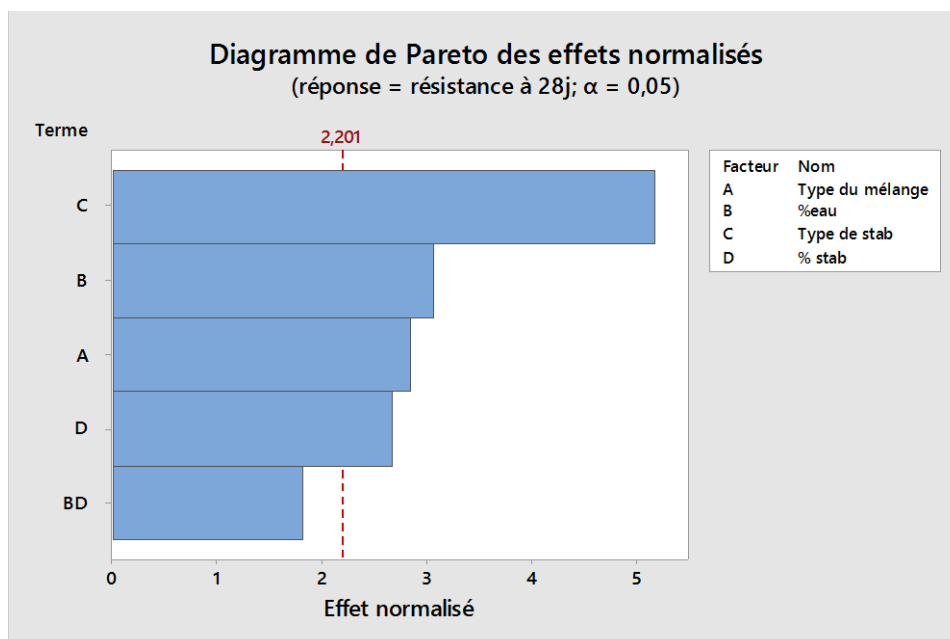
Figure V.6 : Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours.

- Lorsque la quantité d'eau augmente la résistance à 7 jours est diminuée.
- La meilleure valeur de résistance à 7 jours (16 Mpa) est obtenue avec (5%) d'eau et avec le stabilisant « Matine ».
- le mélange (50G/50R) est le meilleur parmi tous les mélanges réalisés.
- La chaux donne un mauvais résultat.

**\*Equation de Modélisation :**

$$\begin{aligned}
 \text{résistance à 7j} = & 10,115 + 0,211 \text{ Type du mélange}_{50G/50R} - 0,211 \text{ Type du mélange}_{75G/25R} \\
 & + 3,842 \% \text{eau}_{5} - 0,623 \% \text{eau}_{8} - 3,219 \% \text{eau}_{10} - 1,86 \text{ Type de stab}_{\text{CHAUX}} \\
 & + 0,158 \text{ Type de stab}_{\text{CRS}} + 1,706 \text{ Type de stab}_{\text{MATINE}} - 0,985 \% \text{stab}_{6} \\
 & + 0,985 \% \text{stab}_{10} - 0,230 \text{ Type du mélange} * \% \text{eau}_{50G/50R} 5 \\
 & + 0,541 \text{ Type du mélange} * \% \text{eau}_{50G/50R} 8 - 0,311 \text{ Type du mélange} * \% \text{eau}_{50G/50R} \\
 & 10 + 0,230 \text{ Type du mélange} * \% \text{eau}_{75G/25R} 5 - 0,541 \text{ Type du mélange} * \\
 & \% \text{eau}_{75G/25R} 8 + 0,311 \text{ Type du mélange} * \% \text{eau}_{75G/25R} 10 \\
 & - 0,451 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{50G/50R} \text{CHAUX} \\
 & + 1,004 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{50G/50R} \text{CRS} \\
 & - 0,554 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{50G/50R} \text{MATINE} \\
 & + 0,451 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{75G/25R} \text{CHAUX} \\
 & - 1,004 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{75G/25R} \text{CRS} \\
 & + 0,554 \text{ Type du mélange} * \text{Type de stab}_{75G/25R} \text{MATINE} \\
 & + 0,108 \text{ Type du mélange} * \% \text{stab}_{50G/50R} 6 - 0,108 \text{ Type du mélange} * \\
 & \% \text{stab}_{50G/50R} 10 - 0,108 \text{ Type du mélange} * \% \text{stab}_{75G/25R} 6 \\
 & + 0,108 \text{ Type du mélange} * \% \text{stab}_{75G/25R} 10 + 2,22 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \\
 & \text{CHAUX} 6 - 2,22 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \text{CHAUX} 10 \\
 & - 0,925 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \text{CRS} 6 + 0,925 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \\
 & \text{CRS} 10 - 1,292 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \text{MATINE} 6 \\
 & + 1,292 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{5} \text{MATINE} 10 - 0,77 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \\
 & \% \text{stab}_{8} \text{CHAUX} 6 + 0,77 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{8} \text{CHAUX} 10 \\
 & + 1,04 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{8} \text{CRS} 6 - 1,04 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{8} \\
 & \text{CRS} 10 - 0,267 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{8} \text{MATINE} 6 \\
 & + 0,267 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{8} \text{MATINE} 10 - 1,44 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \\
 & \% \text{stab}_{10} \text{CHAUX} 6 + 1,44 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{10} \text{CHAUX} 10 \\
 & - 0,12 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{10} \text{CRS} 6 + 0,12 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{10} \\
 & \text{CRS} 10 + 1,56 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{10} \text{MATINE} 6 \\
 & - 1,56 \% \text{eau} * \text{Type de stab} * \% \text{stab}_{10} \text{MATINE} 10
 \end{aligned}$$

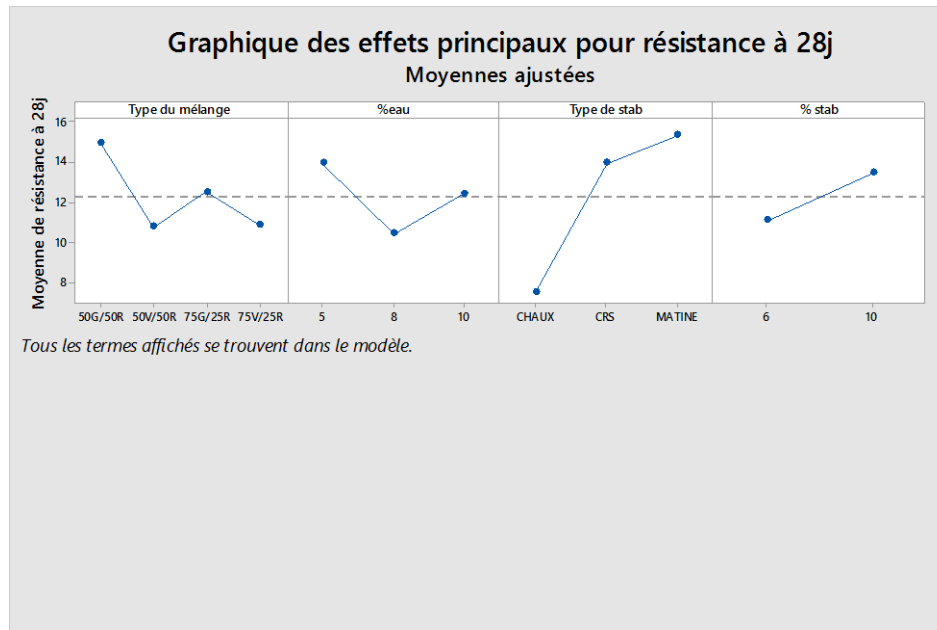
**V.2.4.7 diagramme de Perto des effets pour la résistance à 28 jours :**



**Figure V.7 : Diagramme des effets pour la résistance à 28 jours.**

-Tous les facteurs ont un impact sur la résistance à la compression après 28 jours.  
Par conséquent le facteur type de stabilisant est le plus important et principal(5,16).

#### V.2.4.8 Les effets principaux pour la résistance à 28 jours :



**Figure V.8 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 28 jours.**

Ce graphe nous donne l'effet de chaque constituant sur la résistance à la compression (à 28 jours) :

-Tous les types de mélanges ont donné des valeurs supérieures à 10 Mpa seulement le type (50G/50R) à donné le meilleur résultat supérieur à 10 Mpa.

Tous les types de mélanges sont considérés acceptables.

-la résistance augmente à 28 jours quand le pourcentage d'eau varié entre (5%) et (10 %).

- les meilleures valeurs de résistance sont dues des types de stabilisants MATINE et CRS.

- la résistance augmente quand le (%) de stabilisant est de pourcentage supérieur à (6%).

#### V.2.4.9 : Interactions des facteurs :

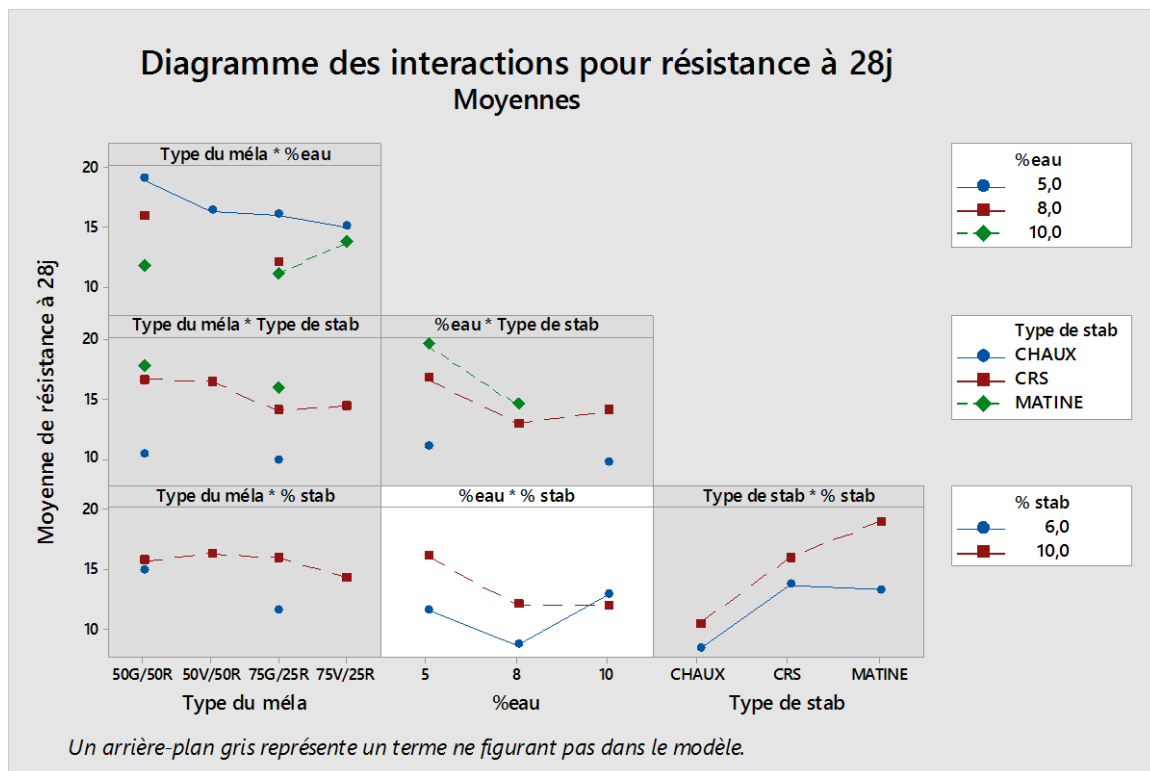


Figure V.9 : Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours.

-Tous les mélanges permettent d'obtenir une résistance supérieur à 10 Mpa quelque soit le type de mélange ; le pourcentage de stabilisant ou le type de stabilisant.

-Quelque soit le mélange dont le pourcentage d'eau supérieur ou égale à (5%) est le mélange parfait parce qu'il donne une résistance supérieur à 15 Mpa.

-Le mélange optimale telque la résistance supérieure à 15 Mpa est obtenue avec les stabilisants « Matine » ou « CRS ».

- la meilleure valeur de résistance (20 Mpa) avec (5%) d'eau et avec le stabilisant « Matine » .

-pour réaliser un mélange économique (6%) de stabilisant je dois choisir le mélange (50G/50R).

- Avec (10%) d'eau et (6%) de stabilisant (Matine ou CRS) on peut obtenir un résultat parfait (proche de 15 Mpa).

**Conclusion :**

On peut réaliser un mélange avec une résistance supérieure à 15 Mpa avec la possibilité de choix de quantité d'eau.

**\*Equation de Modélisation :**

$$\begin{aligned}
 \text{résistance à 28j} = & 12,261 + 2,636 \text{ Type du mélange}_{50G/50R} - 1,51 \text{ Type du mélange}_{50V/50R} \\
 & + 0,265 \text{ Type du mélange}_{75G/25R} - 1,396 \text{ Type du mélange}_{75V/25R} \\
 & + 1,671 \% \text{eau}_5 - 1,845 \% \text{eau}_8 + 0,174 \% \text{eau}_{10} - 4,752 \text{ Type de stab\_CHAUX} \\
 & + 1,683 \text{ Type de stab\_CRS} + 3,069 \text{ Type de stab\_MATINE} - 1,168 \% \text{stab}_6 \\
 & + 1,168 \% \text{stab}_{10} - 1,112 \% \text{eau} * \% \text{stab}_5 \text{ 6} + 1,112 \% \text{eau} * \% \text{stab}_5 \text{ 10} \\
 & - 0,507 \% \text{eau} * \% \text{stab}_8 \text{ 6} + 0,507 \% \text{eau} * \% \text{stab}_8 \text{ 10} + 1,619 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{10} \text{ 6} \\
 & - 1,619 \% \text{eau} * \% \text{stab}_{10} \text{ 10}
 \end{aligned}$$

**Conclusion :**

Des nombreux essais que nous avons réalisés, nous permettent d'avancer certaines idées sur la stabilisation des briques par le ciment et la chaux. Les résultats obtenus ont montré que la stabilisation au ciment donne les meilleurs résultats en résistance par rapport à la chaux.

La stabilisation dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- La nature de stabilisant et sa quantité
- La qualité de la terre
- La qualité du compactage
- Du teneur en eau

La réduction de la masse volumique est du à l'excès d'eau.

**« CONCLUSION  
GENERALE »**

### Conclusion générale :

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

Pour valoriser les matériaux et les savoir-faire locaux, Des blocs de terre comprimée sont réalisés après stabilisation par le ciment et la chaux.

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié comment améliorer le comportement mécanique des blocs de terre comprimée, en vue de rendre utilisable dans la construction, il est nécessaire de s'assurer qu'ils possèdent des propriétés mécaniques suffisante (résistance à la compression et à la flexion).

Des essais de convenance de terre ont été élaborés par les différents moyens de laboratoire qui nous ont permis de faire les tests d'identification avant de procéder a la stabilisation, une bonne maîtrise des techniques d'identification orientera les choix en matière de stabilisation.

La stabilisation au ciment améliore considérablement la résistance mécanique Par contre, dans le cas de stabilisation à la chaux, l'addition n'apporte que peu d'amélioration au niveau de résistance mécanique.

Les bonnes performances des terres stabilisées dépendent largement de la granulométrie pour qu'une terre donne des briques ayant de bonnes caractéristiques mécaniques.

L'objectif est d'aboutir à la fabrication d'une BTCS possédant une bonne résistance à la compression et à la flexion.

La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum.

La méthode expérimentale se base sur le choix des facteurs appropriées au chercheur.

Les résultats des études ou les réponses seront lus à travers logiciel Minitab, ils seront donnés sous formes des graphes et des figures bien explicites.

Les interactions des facteurs se traduisent à travers des graphes.

L'utilisation du plan d'expérience permet d'élaborer un mélange parfait dans le cadre de 3 objectifs : la masse volumique, la résistance à la compression à 28 jours et la résistance à la flexion.

Les résultats obtenus ont montré que :

-On a pu obtenir une résistance optimale à 28 jours égale à 20 Mpa, une masse volumique proche de  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  et une résistance à la flexion.

-La chaux n'est pas compatible à la fabrication du BTC par rapport à « Matine » et « CRS »

-On a pu obtenir une brique économique avec (6%) de ciment et qui peut atteindre une résistance à la compression supérieure à 15 Mpa.

- On peut contrôler la quantité d'eau du mélange pour obtenir la meilleure performance du mélange de point de vue : résistance à la compression, compacité, cohésion et masse volumique.

L'équation de modélisation sera prise autant que formule de la bonne et meilleure confection des BTCS :

**$\text{résistance à 28j} = 12,261 + 2,636 \text{ Type du mélange}_{50G/50R} + 1,671 \% \text{eau}_5 + 3,069 \text{ Type de stab}_{MATINE} + 1,168 \% \text{stab}_{10} + 1,112 \% \text{eau} * \% \text{stab}_5$**

Le moule doit être suffisamment solide pour résister aux pressions élevées exercées par le matériau lorsqu'il est comprimé, c'est un moule spécial développé pour cette étude.

Les résultats ont montré que le procédé de compactage proposé améliore le comportement mécanique de la BTCS. Ce procédé proposé entraîne une réduction significative de la porosité du matériau.

-En respectant les directives du CNERIB, on peut déduire que les BTCS ont prouvé une bonne résistance à la flexion.

Enfin, les argiles sont des matériaux de différentes compositions dont l'étude devrait être plus approfondie avec les différents stabilisants pour améliorer leurs comportements mécaniques et physiques.

## Références bibliographiques

- [1] **Chaib. H. (2017)**. Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques. des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville d'Ouargla).
- [2] **Taallah B. (2014)**. Etude du Comportement Physico-mécanique de bloc de terre comprimée avec fibres.
- [3] **Ouedraogo L.A. (2012)**. Etude des Briques en Terre Comprimée-BTC stabilisées à la chaux des sols de Dori : Application.
- [4] **Salmi.S. (2014)**. La Construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers cas du village kabyle Ait Itchir.
- [5] **Boucif, N., & Ayad, F. (2017)**. Matériau terre: étude de la résistance au cisaillement et retrait.
- [6] **Mahamat S. (2010)**. étude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte.
- [7] **Anger & Fontaine**, bâtie en terre : du grain de sable à l'architecture, 2009.
- [8] **Anger & Fontaine**, Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture, (2005).
- [9] **Jehanne P, (2015)**, Construction en terre crue : Dispositions Qualitatives, Constructives et Architecturales, Application à un cas pratique : Ouagadougou.
- [10] **Miraucourt, D. (2017)**. Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso, 103. Retrieved from <https://matheo.ulg.ac.be/bitstream/2268.2/2539/1/TFE Miraucourt David final 2.pdf>
- [11] **CRA Terre, P. DOAT, .et AL**, Construire en Terre, Edition Alternative Paris, 1983.
- [12] **Guillaud, H., & Houben, H. (1995)**. Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.
- [13] **Layeb.A, Halbaoui.A(2017)**. Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre).
- [14] **Florian C, (2017)**. Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue Compactée pour la construction.
- [15] **CRATerre. (1991)**. Le bloc de terre comprimée Elements de base.
- [16] **Houben H, Rigassi V, Garnier P**. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, p14, 1996.
- [17] **Festa Jean et Dreux Georges. (2007)**. Nouveau guide du beton et de ses constituants.pdf (EYROLLES).

- [18] **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- [19] **Houben H, Guillaud H.** Traité de construction en terre. CRA Terre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [20] **Ghaffour W.**(2014).Patrimoine architectural, entre technicité, confort et durabilité : Cas de la maison de L'Oukil du Sanctuaire de Sidi Boumediene.
- [21]CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles, Ed CNERIB, 2000, p31
- [22] **Pedro G.** Les minéraux argileux, 47-64, dans pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris, France, 665p, 1994.
- [23] **Mckenzie RC.** The classification of soil silicates and oxydes. In : Soil components vol. 2 ; Inorganic components. Gieseck J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, , pp.1-25,1975.
- [24] **United Nations.** Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- [25] **Tinsson, W.** (2010). Plans d'expérience: constructions et analyses statiques.
- [26] Cours Pr.Bencheikh : La méthode des plans d'expériences.

# ANNEXES



# Mokaouem مقاوم بلوس Plus



## Ciment Portland

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

**Mokaouem** est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inférieure à celle d'un ciment portland composé.

### **Mokaouem**

NA 442 - CEM I 42,5 N-SR3

**Mokaouem** NA 442 -CEM I 42,5 N-SR3 selon la NA 442 v 2013 et la EN 197-1II est conforme à la norme nationale NA 442 v 2013 et à la norme Européenne EN 197-1 avec un taux en C3A < 3%.

### AVANTAGES PRODUIT



- Tout en étant un ciment de haute performance, **Mokaouem** protège la structure contre les agressions chimiques de l'environnement externe.
- Une meilleure durabilité pour les structures en béton.
- Une faible chaleur d'hydratation.











## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif
- Les travaux maritimes
- Les stations de dessalement et d'épuration
- Les travaux hydrauliques
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 		Eau (litres) 
		0/5	8/15mm	15/25mm	
<b>Dosage pour béton C25/30</b>	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Formulation de béton à suivre dans le cas de l'absence d'une étude délivrée par un laboratoire"

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	0,5 à 3 %
Teneur en sulfates (SO3) (%)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,2 à 3
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0,01 à 0,05

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	> 60
Fin de prise (min)	240 à 400

### • Composition minéralogique

	Valeur
Taux d'aluminate C3A	<3.0%

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥10
28 jours (MPa)	≥42.5

### • Propriétés physiques

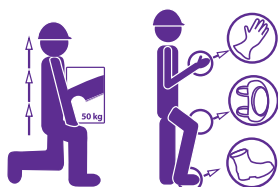
	Valeur
Consistance Normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤2,0
Chaleur d'hydratation	<270j/g

Ces valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être considérées comme absolues

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

**1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU :** Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

**2- MANUTENTION :** levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement:



ALGÉRIE



# متين Matine

**LAFARGE**  
Construire  
des villes meilleures™



## ***Ciment pour béton exigeant***

**CPJ - CEM II/B 42.5 N**

**Matine** Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

### **Matine**

CPJ - CEM II/B 42.5 N.

**Matine** est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA 442) et Européenne (EN 197-1)

### **AVANTAGES PRODUIT**











- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton c25/30	X 1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

### • Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

### • Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02, Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie

Tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com

 **LAFARGE**  
لافارج