

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et Hydraulique

Référence :...../ 2020



جامعة محمد خيضر- بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

المرجع: ..... / 2020

## Mémoire de Master

2<sup>ème</sup> année

Option : matériaux de génie civil

THEME

**Effet des ajouts minéraux avec la chaux  
sur la durabilité de mortier de terre crue.**

Etudiant:

•GUERFI Khaoula

Encadrant:

• Mme : Izemmouren Ouarda

Années universitaire : 2019/2020

# Remerciements

*Avant tout, je remercie Dieu qui m'a donné la force et la Patience de faire ce travail.*

*Je voudrais remercier mon père et mon mère et toute ma famille pour leur encouragement et leur soutien pour finaliser mon mémoire.*

*Je voudrais exprimer ma gratitude au Docteur (Izemmouren Ouarda) mon encadreur de mémoire pour la qualité des nombreux conseils, son attention, ainsi que pour son soutien tout au long de réalisation de ce projet*

*Le grand merci pour les membres du jury de leur présence pour évaluer et participer à la conclusion de mon modeste travail*

# Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents*

*Mes frères « Anis, Bouthaina »*

*Toute ma famille (Guerfi)*

*Tous mes amis en particulier (Zahra ,Iman et  
Roumaïsa)*

*A la promotion master 2, matériaux en génie civil,*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du*

*Primaire, du moyenne, du secondaire ou de*

*L'enseignement supérieur*

*Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et  
soutenu.*

*Toute et à tous ce que j'aime*

## Résumé

L'utilisation de la terre comme matériau de construction présente de nombreux avantages en termes de durabilité: c'est un matériau naturel, non toxique et écologique, à faible intensité énergétique, à faibles émissions de carbone et recyclable. Les mortiers à base de terre reprennent leur place en tant que matériaux de construction pour le plâtrage, l'enduit et la réparation des murs de terre, non seulement dans un contexte durable mais aussi en termes d'efficacité. Cependant, les connaissances scientifiques sur ces mortiers sont encore rares. En particulier, les avis sur les effets de l'ajout de liants minéraux comme stabilisants, pour améliorer les performances du mortier, sont contradictoires.

L'étude présentée dans ce travail vise à faire progresser les connaissances sur les effets de l'ajout de faibles quantités de la pouzzolane naturel, poudre de verre et laitier (2%, 4%, 6% et 8% du poids de la chaux) et 10% de chaux vive, sur les aspects mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et durabilité (absorption d'eau totale et capillaire, gonflement et abrasion).

Les résultats montrent que l'ajout de 2% de la poudre de verre, pouzzolane et laitier augmente la résistance à la compression, la résistance à la traction le coefficient d'abrasion et diminue l'absorption d'eau totale et capillaire et gonflement des mortiers.

Les meilleures valeurs des résistances et durabilité du mortier sont obtenues par l'ajout de poudre de verre suivis de laitier puis de pouzzolane.

**Mots clés:** mortier de terre, ajouts minéraux, chaux, résistances mécaniques, durabilité.

## المخلص

إن استخدام الأرض كمواد بناء لها العديد من المزايا من حيث الاستدامة: فهو مادة طبيعية و غير سامة و صديقة للبيئة ، ومنخفضة في كثافة الطاقة ، و انبعاثات منخفضة من الكربون وقابلة لإعادة التدوير . يستعيد ملاط الأرضية مكانها كمواد بناء لإصلاح الجدران الترابية ، ليس فقط في سياق مستدام ولكن أيضًا من حيث الكفاءة . ومع ذلك ، لا تزال المعرفة العلمية عن الملاط نادرة . على وجه الخصوص ، تتناقض الآراء حول آثار إضافة مواد رابطة معدنية كمثبتات لتحسين أداء الملاط .

تهدف دراسة هذا العمل إلى تعزيز المعرفة بآثار إضافة كميات صغيرة من البوزولان الطبيعي ومسحوق الزجاج والخبث (2% ، 4% ، 6% ، و 8% بوزن الجير . ) و 10% من الجير الحي ، على الجوانب الميكانيكية (قوة الانضغاط ، قوة الشد) و المتانة (امتصاص الماء الكلي والشعري ، الانتفاخ والتآكل) .

أظهرت النتائج أن إضافة 2% من مسحوق الزجاج والبوزولان والخبث يزيد من قوة الانضغاط و قوة الشد و معامل التآكل و يقلل من امتصاص الماء الكلي والشعري و انتفاخ الملاط . يتم الحصول على أفضل قيم القوة و المتانة للملاط بإضافة مسحوق الزجاج متبوعًا بالخبث ثم البوزولان .

**الكلمات المفتاحية:** ملاط أرضي ، إضافات معدنية ، جير ، مقاومة ميكانيكية ، متانة .

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICACE</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>III</b>
<b>الملخص</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTE DESTABLEAUX</b> .....	<b>X</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>2</b>

## **1 CHAPITRE 01: construction en terre crue**

1.1	Introduction .....	5
1.2	Avantages et inconvénients .....	5
1.3	Les argiles.....	6
1.3.1	Définition de l'argile.....	6
1.3.2	Structure de minéraux argileux .....	6
1.3.3	Minéraux de types 1:1 (TO) Structure du kaolin .....	7
1.3.4	Minéraux de type 2 :1 (TOT) (L'illite) .....	8
1.3.5	Minéraux de type 2 :1 (TOT) (Smectites ou montmorillonites) .....	8
1.4	Stabilisation de la terre .....	10
1.4.1	Définition .....	10
1.4.2	Les objectifs .....	10
1.4.3	Les procédés.....	11
1.5	Mécanismes de réactions sol – chaux.....	14
1.5.1	L'échange cationique .....	14
1.5.2	Floculation et agglomération.....	15

1.5.3	Réaction pouzzolaniques.....	15
1.5.4	Carbonatation .....	16
1.6	Les ajouts minéraux.....	16
1.6.1	Pouzzolanes.....	16
1.6.2	Laitiers de hauts fourneaux .....	17
1.6.3	Poudre de verre.....	18
1.7	Effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des briques de terre.....	19
1.8	Conclusion.....	22

## **2 CHAPITRE 02 : Caractéristiques des matériaux et méthodes d'essais**

2.1	Introduction .....	24
2.2	Matériaux utilisés .....	24
2.2.1	Sol.....	24
a)	Densité des grains (NF P 94-053) .....	25
b)	Limites d'Atterberg (NF P 94-051) .....	25
c)	Composition granulaire.....	27
2.2.2	Sable concassé.....	30
2.2.3	La chaux .....	33
2.2.4	Les ajouts minéraux .....	34
2.3	Conduite de l'essai.....	35
2.3.1	Matériel spécifique.....	35
2.3.2	Préparation des mélanges .....	35
2.3.3	Composition des mélanges.....	37
2.3.4	Mode de conservation : .....	37
2.4	Résistances mécaniques.....	38

2.4.1	Essai de compression simple (NF XP- P 13 901) .....	38
2.4.2	Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5).....	39
2.5	Essai de la durabilité.....	40
2.5.1	Absorption capillaire (NF XP- P 13 901).....	40
2.5.2	Absorption totale d'eau : .....	41
2.5.3	Gonflement.....	42
2.5.4	Résistance à l'abrasion .....	43
2.6	Conclusion.....	44
<b>3 CHAPITRE 03 : Résultats et discussions</b>		
3.1	Introduction .....	46
3.2	Résistances mécaniques.....	47
3.2.1	Résistance à la compression simple .....	47
3.2.2	Résistance à la traction .....	48
3.3	Essai de la durabilité.....	49
3.3.1	Absorption capillaire .....	49
3.3.2	Absorption totale d'eau .....	50
3.3.3	Gonflement.....	51
3.3.4	Résistance à l'abrasion .....	52
3.4	Conclusion.....	53
<b>Conclusion Générale.....</b>		<b>54</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>56</b>
<b>La liste des normes.....</b>		<b>60</b>



## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b>	Structure du tétraèdre $\text{SiO}_4$ .....	6
<b>Figure 1.2</b>	Structure de l'octaèdre $\text{Al}_2\text{O}_6$ .....	7
<b>Figure 1.3</b>	Schéma de la structure de la kaolinite.....	7
<b>Figure 1.4</b>	Schéma de la structure de l'illite.....	8
<b>Figure 1.5</b>	Forme structurale d'une structure <b>T-O-T</b> (Smectites ou montmorillonites).....	9
<b>Figure 1.6</b>	Feuillets argileux et leurs empilements .....	9
<b>Figure 1.7</b>	Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles.....	10
<b>Figure 1.8</b>	Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment.....	12
<b>Figure 1.9</b>	Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids.....	14
<b>Figure 1.10</b>	Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme.....	15
<b>Figure 1.11</b>	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression.....	19
<b>Figure 1.12</b>	Influence du dosage en ajout sur l'absorption totale.....	20
<b>Figure.2.1</b>	le sol.....	24
<b>Figure.2.2</b>	Détermination de WL et WP.....	26
<b>Figure.2.3</b>	Limites d'Atterberg.....	26
<b>Figure.2.4</b>	Classification des sols étudiés sur le diagramme de Casagrande.....	27
<b>Figure.2.5</b>	Courbe granulométrique de sol.....	28
<b>Figure.2.6</b>	sable concassé.....	30
<b>Figure.2.7</b>	Essai de l'analyse granulométrique du sable concassé.....	31
<b>Figure.2.8</b>	Courbe granulométrique de sable concassé.....	31
<b>Figure.2.9</b>	La chaux.....	33
<b>Figure.2.10</b>	Pouzzolane broyé.....	34
<b>Figure.2.11</b>	Poudre de verre.....	34
<b>Figure.2.12</b>	Laitier.....	34
<b>Figure.2.13</b>	Le moule utilisé pour le moulage.....	35
<b>Figure.2.14</b>	mélange et malaxeur.....	36
<b>Figure.2.15</b>	Conservation des blocs.....	38
<b>Figure.2.16</b>	Essai de compression.....	39
<b>Figure.2.17</b>	Schéma du montage de flexion 3 points.....	40

<b>Figure.2.18</b>	Essai de traction par flexion.....	40
<b>Figure.2.19</b>	Schéma de l'essai d'absorption.....	41
<b>Figure.2.20</b>	Essai d'absorption par capillaire.....	41
<b>Figure.2.21</b>	Essai d'absorption totale.....	42
<b>Figure.2.22</b>	Essai de gonflement.....	43
<b>Figure.2.23</b>	Essai d'abrasion.....	44
<b>Figure 3.1</b>	Programme experimental.....	46
<b>Figure 3.2</b>	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression.....	47
<b>Figure 3.3</b>	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la traction.....	48
<b>Figure 3.4</b>	Changement du coefficient d'absorption capillaire en fonction du dosage des ajouts.....	49
<b>Figure 3.5</b>	Changement du coefficient d'absorption totale en fonction du dosage des ajouts.....	50
<b>Figure 3.6</b>	Changement du gonflement en fonction du dosage des ajouts.....	51
<b>Figure 3.7</b>	Changement du coefficient d'abrasion en fonction du dosage en ajout.....	52

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 .1</b>	Composition chimique du laitier de haut fourneau.....	17
<b>Tableau 1 .2</b>	Composition chimiques de quelques verres.....	18
<b>Tableau 1 .3</b>	Effet des différents ajouts sur les propriétés du mortier de terre.....	21
<b>Tableau 2 .1</b>	la Masses Volumiques du sol.....	25
<b>Tableau 2 .2</b>	Limites d'Atterberg de sol.....	26
<b>Tableau 2 .3</b>	Classification des sols d'après Philipponat.....	29
<b>Tableau 2 .4</b>	Valeur du bleu de méthylène.....	29
<b>Tableau 2 .5</b>	Les Catégorie des Sables.....	32
<b>Tableau 2 .6</b>	Les caractéristiques physiques du sable concassé.....	32
<b>Tableau 2 .7</b>	Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive.....	33
<b>Tableau 2 .8</b>	Les caractéristiques physiques des ajouts minéraux.....	34
<b>Tableau 2 .9</b>	Composition des différents mélanges employés dans cette étude.....	37

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## **Introduction générale**

Les murs de maçonnerie sont constitués d'éléments de mortier et de maçonnerie. Une variété de mortiers et d'éléments de maçonnerie sont utilisés pour la construction de maçonnerie. Le mortier de terre était couramment utilisé pour la construction de maçonnerie dans le passé, en particulier pour les structures de faible hauteur avec des murs plus épais. Le mortier de chaux était populaire, en particulier pour la construction de palais. Les mortiers composites contiennent un matériau supplémentaire comme la chaux, des fines comme des matériaux de pouzzolane, etc. en combinaison avec du ciment. Les mortiers composites couramment utilisés comme les mortiers de ciment et de chaux possèdent une bonne maniabilité, une bonne rétention d'eau et une meilleure adhérence par rapport aux mortiers de ciment purs. Le remplacement du sol par de la chaux dans de tels mortiers donne des mortiers ciment-sol qui sont économiques, par rapport aux mortiers de ciment avec des propriétés améliorées.

L'utilisation des ajouts minéraux avec la chaux dans la stabilisation des sols amène à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et de leur durabilité vis à vis de l'eau, qui reste un problème majeur menaçant les constructions en terre. Dans ce contexte, il semblerait avantageux d'utiliser la pouzzolane naturelle, poudre de verre et laitier comme ajout avec la chaux pour stabiliser le mortier de terre crue.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des ajouts minéraux, notamment la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et laitier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers de terre crue.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est composé d'une recherche bibliographique en vue de donner un aperçu général sur la construction en terre et un rappel sur les argiles. Ce chapitre présentera aussi l'effet des ajouts minéraux avec la chaux sur la stabilisation de mortier de terre crue.

Le deuxième chapitre est pour identifier les caractéristiques des matériaux utilisés (sol, chaux, sable concassé, et les ajouts minéraux). Il consiste à présenter aussi les procédés des essais utilisés, les mélanges, confection des éprouvettes, optimisations de la chaux, et le mode de conservation ainsi que la résistance mécanique, et finalement la durabilité.

Le troisième chapitre expose les résultats et la discussion de l'étude expérimentale. Ces résultats montrent l'effet des ajouts minéraux avec la chaux sur les résistances mécaniques et la durabilité de mortier de terre crue.

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

# Chapitre 01 : Construction En Terre



## 1.1 Introduction

La terre demeure, à travers l'histoire, l'un des principaux matériaux de construction. Elle est disponible en abondance, et sa transformation en matériau de construction requiert peu de dépenses énergétiques. Ses grandes qualités plastiques et écologiques en ont fait un matériau de choix pour la construction à travers les âges. L'industrialisation dans les pays développés a favorisé l'utilisation massive des parpaings, bétons et autres liants hydrauliques au détriment de la terre crue. Mais avec les inconvénients environnementaux qu'engendrent ces matériaux, la construction en terre crue connaît aujourd'hui un regain d'intérêt dans les pays en développement et même dans les pays industrialisés. Malgré les faiblesses qu'elle présente à l'état actuel (forte sensibilité à l'eau, manque de durabilité) la construction en terre crue présente, dans sa forme stabilisée et selon la technique utilisée, d'énormes avantages environnementaux en tant que voie écologique. (Houben,1996).

## 1.2 Avantages et inconvénients

### ✓ Avantages

- Présente partout et totalement recyclable
- Très bon régulateur d'humidité
- Bonne inertie thermique, incombustible
- Patrimoine régional à conserver...
- Seul matériau « accessible » dans de très nombreux pays...

### ✓ Inconvénients

- Peu de connaissance scientifique
- Pas de règles professionnelles, ni de normalisation
- Sensible à l'eau
- Faiblement isolant





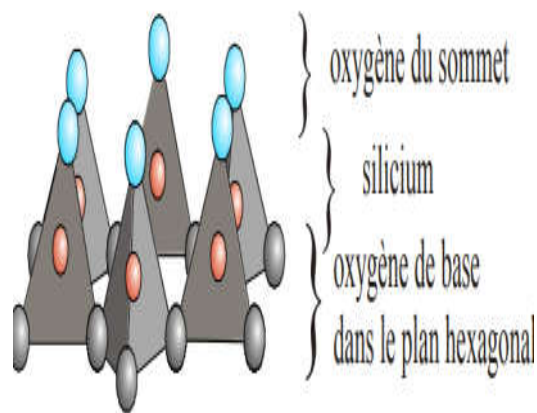
### 1.3 Les argiles

#### 1.3.1 Définition de l'argile

On peut définir le matériau "argile" par la taille des grains et par la minéralogie. En général, le géologue considère comme "argile" tout minéral de faible granulométrie, dont la fraction fine dominante est en général inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . provenant des roches et des sols (Alves de Azevero ,2005).

#### 1.3.2 Structure de minéraux argileux

Ils sont généralement composés des phyllo silicates hydratés qui forment des feuillet infinis bidimensionnels. Le réseau cristallographique des phyllo silicates est basé sur un réseau de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  **Figure 1.1**. Chaque tétraèdre  $\text{SiO}_4$  partage 3 sommets avec les tétraèdres voisins ; l'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan, est partagé avec un octaèdre  $\text{AlO}_6$  **Figure 1.2**. C'est l'association de couches tétraédriques (T) et de couches octaédriques (O) qui constitue le motif du réseau cristallin de chaque argile (Cabane, 2004 ; Caillère et al, 1982).



**Figure 1.1** : Structure du tétraèdre  $\text{SiO}_4$  (Cabane, 2004)

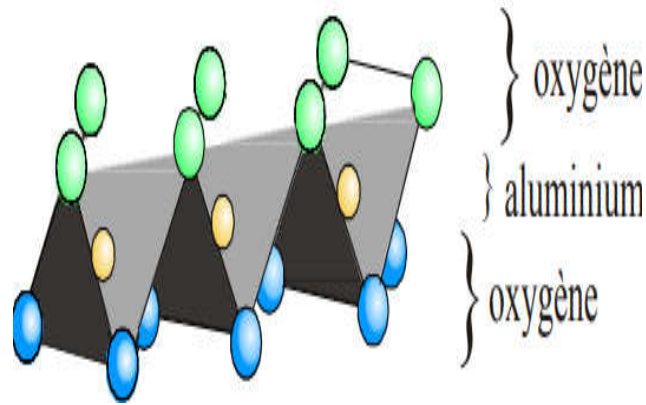


Figure 1.2 : Structure de l’octaèdre  $Al_2O_6$  (Cabane, 2004)

### 1.3.3 Minéraux de types 1:1 (TO) Structure du kaolin

Les minéraux de type 1:1 (ou T-O) sont des minéraux formes de deux couches : une couche d’octaèdres et une couche de tétraèdres. La succession de trois couches d’oxygène constitue le feuillet, ce type correspond le groupe de la kaolinite , avec une épaisseur du feuillet de l’ordre de 7,2 Å (angströms). (Laibi ,2017)

Kaolinite : nous observons qu’il n’y a pas d’adsorption d’eau entre les feuillets de ce minéral. Toute l’adsorption d’eau se fera uniquement par la surface spécifique externe du feuillet. Ce minéral ne présente pas de substitution d’atomes dans les couches (Morel ,1996).

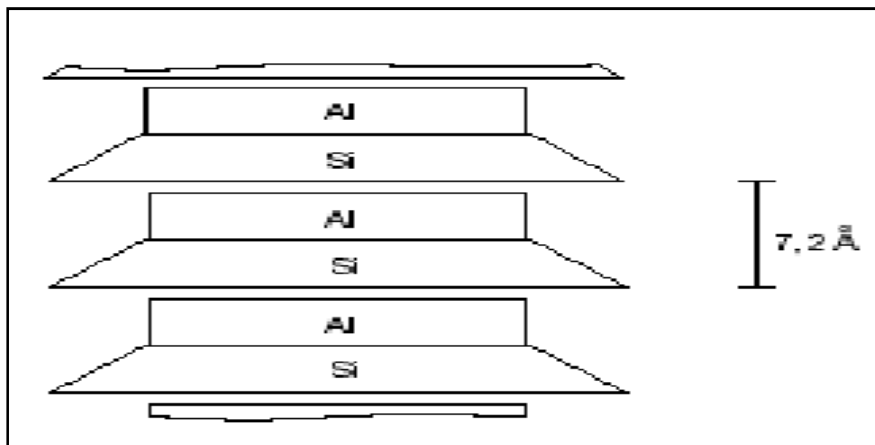
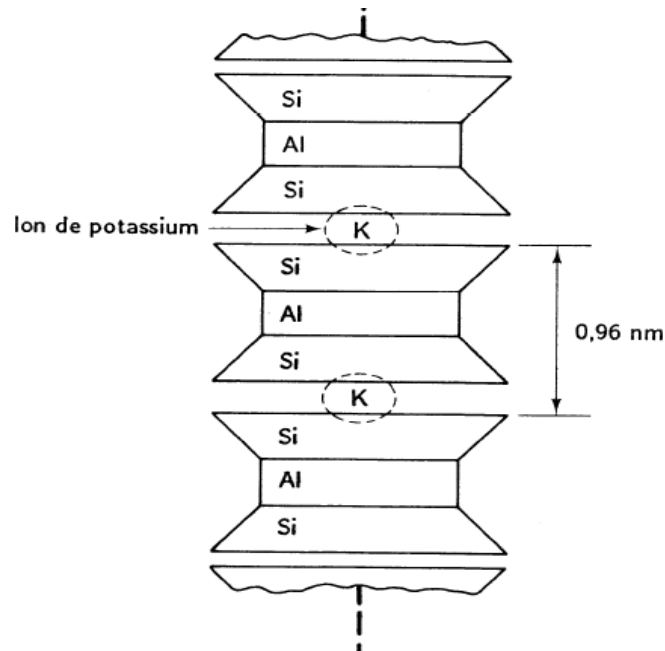


Figure 1.3 : Schéma de la structure de la kaolinite. (Lambe, 1953).

### 1.3.4 Minéraux de type 2 :1 (TOT) (L'illite)

Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) sont formés de 3 couches disposées de la manière suivante :

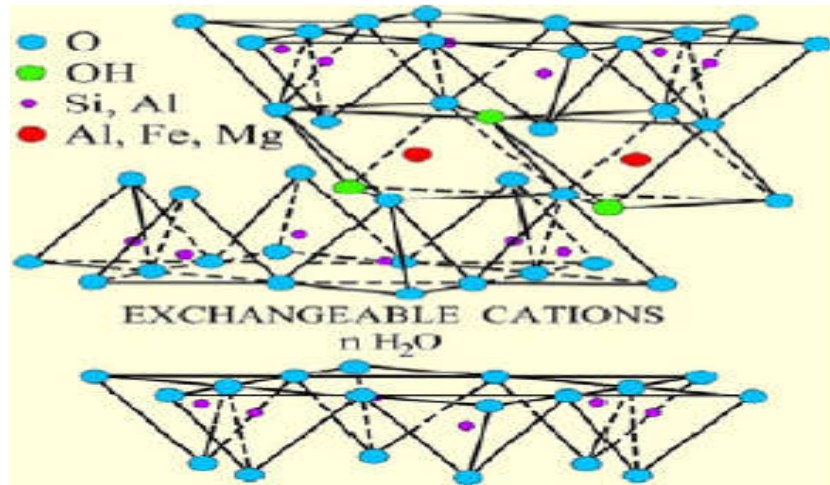
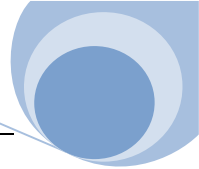
Une couche d'octaèdres contenant de l'aluminium encadrée par deux couches tétraédriques contenant du silicium. Les feuillets sont constitués par la succession de quatre couches d'oxygène. L'équidistance caractéristique varie de 9.4 à 10Å (angströms). Selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type correspondent les groupes du talc, des smaltites, des vermiculites et celui des micas. L'illite appartient à la famille des phyllosilicates **T-O-T** : les atomes de silicium dans les tétraèdres sont remplacés par des atomes d'aluminium. Il y a une charge négative élevée compensée principalement par des ions  $K^+$  avec de fortes liaisons. (Izemouren ,2016).



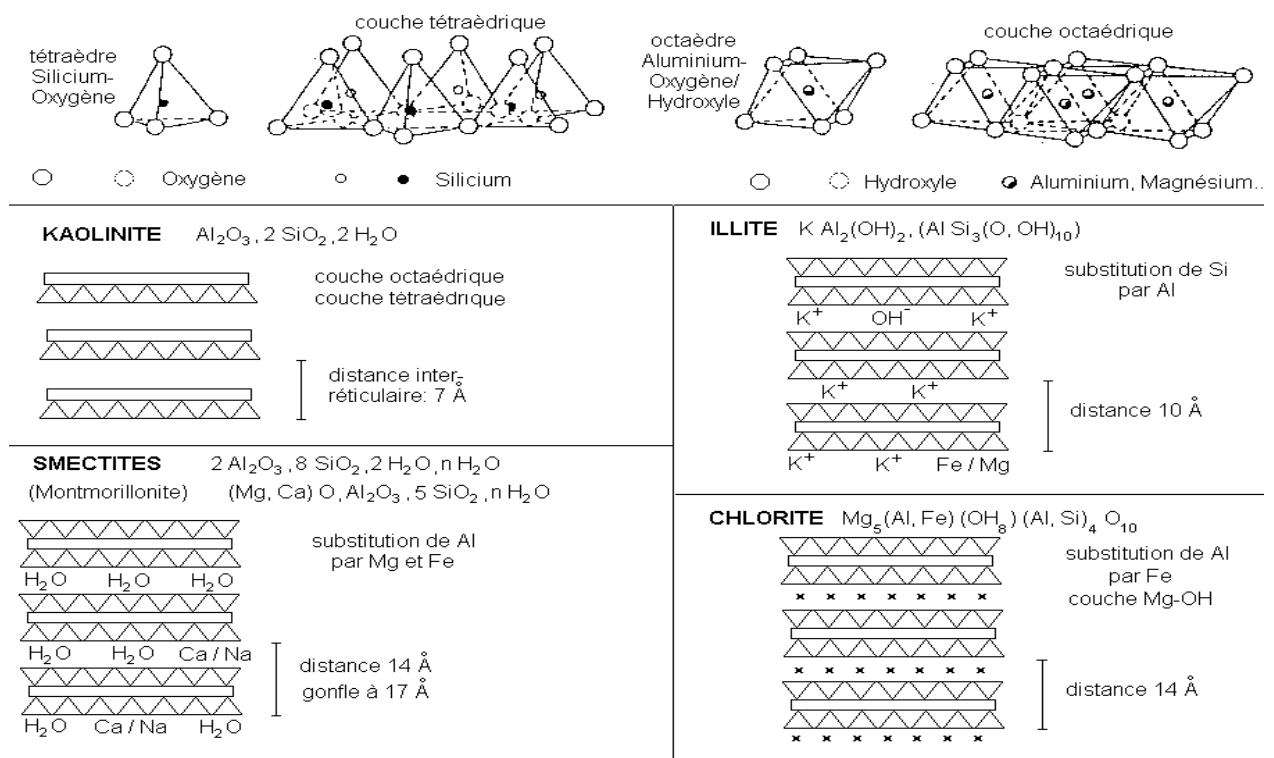
**Figure 1.4:** Schéma de la structure de l'illite ( Lambe, 1953).

### 1.3.5 Minéraux de type 2 :1 (TOT) (Smectites ou montmorillonites)

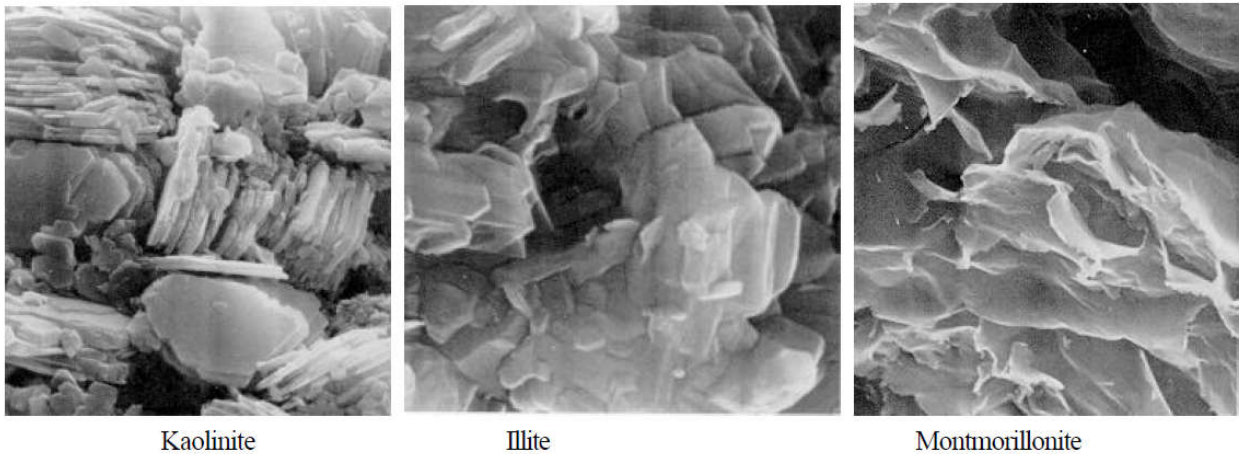
Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. La distance interfoliaire entre 14 à 20Å (angströms). Est une structure similaire à celle de l'illite, mais les feuillets ne sont pas électriquement neutres et faiblement liés. Les ions interfoliaires remplacés par des cations échangeables (Na, Ca) et des molécules d'eau.



**Figure 1.5:** Forme structurale d'une structure T-O-T (Smectites ou montmorillonites).(Poppe et al , 2001).cité par (Izemmour, 2016)



**Figure 1.6** Feuilletts argileux et leurs empilements (Unikowski ,1982 et Alves de azeredo ,2005)



**Figure 1.7 :** Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976 et Bultel, 2001).

## 1.4 Stabilisation de la terre

### 1.4.1 Définition

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système (terre-eau-air) pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière Selon (Houben, 2006) la stabilisation est un phénomène complexe à cause de différents paramètres interviennent par exemple :

- les propriétés de la terre,
- l'économe du projet,
- les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet.

### 1.4.2 Les objectifs

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont :

- ✓ Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques :  
(Augmenté la résistance à la compression et à la traction et au cisaillement)
- ✓ Obtenir une meilleures cohésion ;
- ✓ Réduire la porosité et les variations de volume ;



### 1.4.3 Les procédés

Selon (Houben, 2006) on dénombre trois procédés de stabilisation

#### 1.4.3.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation du sol par compactage est utilisée comme un terme général pour la stabilisation mécanique. C'est le compactage de la terre qui modifier sa densité ; sa résistance mécanique ; sa perméabilité et sa porosité. (Taallah ,2014)

On distingue essentiellement quatre principales méthodes de compression selon (Houben, 2006)

- compactage statique
- compactage par vibro-compression
- compactage dynamique
- compactage par pétrissage

#### 1.4.3.2 Stabilisation physique

On distingue deux manières de procéder à une stabilisation physique: (Houben, 2006)

1. Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le mélange obtenu conduit selon le cas, a la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou a lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.
2. Ajout de fibres végétales a des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

#### 1.4.3.3 Stabilisation chimique

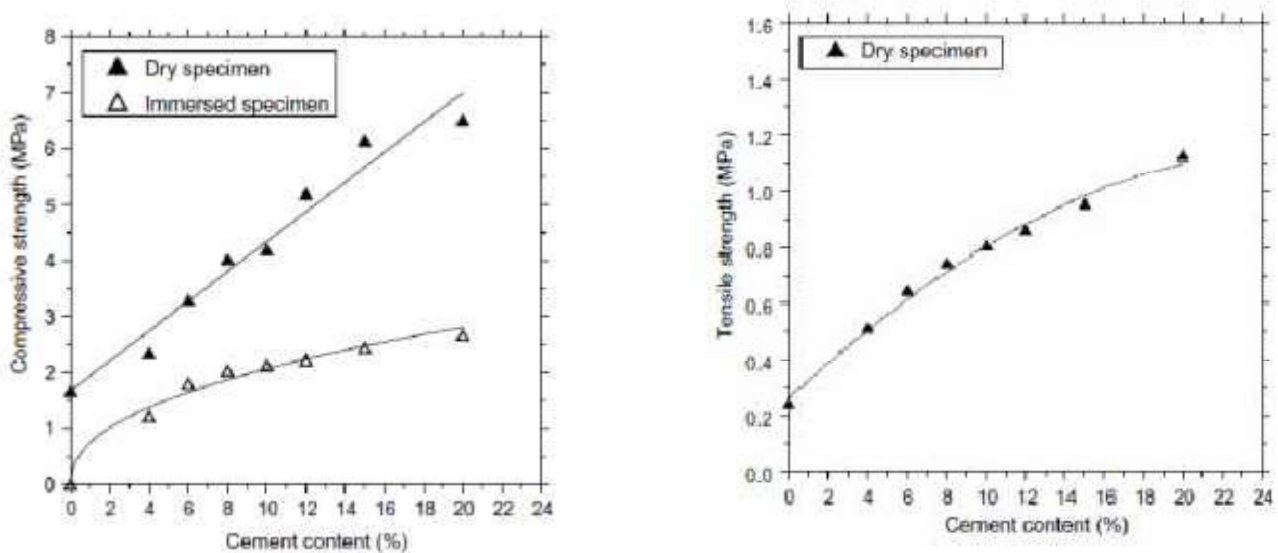
La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains, ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité a l'eau, on a souvent recours a l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété. (Akpodje,1985).

### A) Stabilisation au ciment

Des 1915 déjà les U.S.A ont connu les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, des 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 (Wetshondo, 2012 et Laibi, 2017).

Le ciment agit peu sur les particules fines d'argile, il convient donc mieux aux terres faiblement argileuses. Le dosage dépend de la terre utilisée, il varie entre 5 et 12 % pour obtenir des résultats satisfaisants. La stabilisation au ciment améliore les résistances et la durabilité de la terre. Cependant, il reste un matériau cher qui est de plus polluant. Encore les terres stabilisées au ciment ne sont pas réutilisables. (Izemmouren ,2016)

L'ajout de ciment à un sol augmente nettement sa résistance à la compression (Walker, 1995). (Bahar et al, 2004), ont montré que la résistance à la compression et à la traction par fendage augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment (Figure 1.8).



**Figure 1.8:** Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004)



L'effet principal de la stabilisation au ciment est l'insensibilisation à l'eau du matériau. Par un traitement au ciment bien conduit, on peut obtenir des résultats très satisfaisants. Une étude réalisée par Venkatrama et al (Venkatrama, 2005), a montré que la résistance à la compression humide et la résistance à traction des blocs de terre stabilisée au ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, et qu'en doublant la teneur en ciment, la résistance à la compression humide augmente par 2,3 fois.

### **B) Stabilisation des sols par l'ajout de chaux**

La chaux est parmi les matériaux les plus anciens, Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes (Jarrige, 1989 et taallah, 2014). Aujourd'hui, elle rencontre un intérêt croissant dans le domaine de la construction.

Dans le sol, il existe deux actions différentes qui ont provoqué par la chaux :

- L'action immédiate : se produit directement après que la chaux soit mélangée au sol.
- L'action à long terme : peut durer entre plusieurs mois et quelques années après la mise en œuvre.

La chaux vive est obtenue par la calcination du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ), à une température supérieure de  $900^\circ\text{C}$ . Celle ci est dissociée à cette température en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou chaux vive, dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) selon (l'équation 1.1)



La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau. La matière produite est appelée chaux éteinte ou chaux aérienne selon (l'équation 1. 2)



(Azzouz ,2006) cité par (Zerrouki, 2019) a montré que la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive provoquée l'évaporation d'une partie d'eau (15,5Kcal/mol).

La diminution de la terre en eau est de l'ordre de 1% de teneur en eau par pourcent de chaux vive.

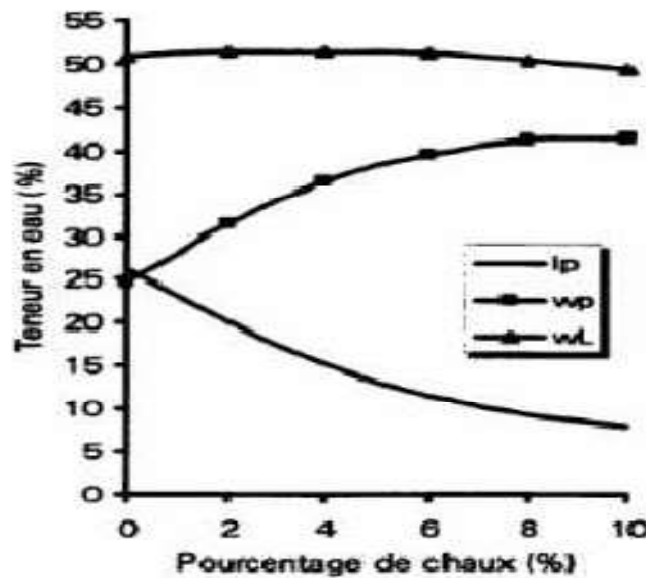
La qualité des argiles est modifiée par l'adjonction de la chaux au sol. Cela change des cations alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ...) par des cations  $\text{Ca}^{++}$  apportés par la chaux. Cette action développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables. (Haras Nationaux,2004)



### 1.5 Mécanismes de réactions sol – chaux

Le mélange chaux-sol-eau déclenche plusieurs réactions (Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux)

Les réactions de l'échange cationique et la floculation, ces réactions augmentent la plasticité, la maniabilité, ainsi que la résistance du sol et réduisent typiquement l'indice de plasticité tel qu'illustré sur la figure 1.9. Cette première phase est reconnue comme étant la période de modification du sol.



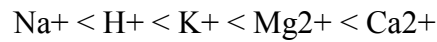
**Figure 1.9:** Variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids (Kézdi, 1979) cité par (Taallah, 2014).

Les réactions pouzzolaniques peuvent aussi avoir lieu, donnant naissance à des agents de cimentations qui augmentent la résistance et la durabilité. La réaction de la carbonatation, la chaux réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour former des carbonates relativement insolubles. Cette réaction est préjudiciable pour le processus de stabilisation.

#### 1.5.1 L'échange cationique

Dans le sol, les argiles ainsi que les matières organiques ont la propriété de fixer l'ion calcium. Pour les argiles, la capacité d'échange cationique correspond aux échanges :

- des cations interfoliaires. Ces échanges concernent plus particulièrement les argiles TOT (smectite, vermiculite ...). La substitution des cations interfoliaires est d'autant plus facile que les cations ont une charge plus faible et sont de petite taille. Ainsi on peut classer les cations par ordre croissant de potentiel de remplacement :

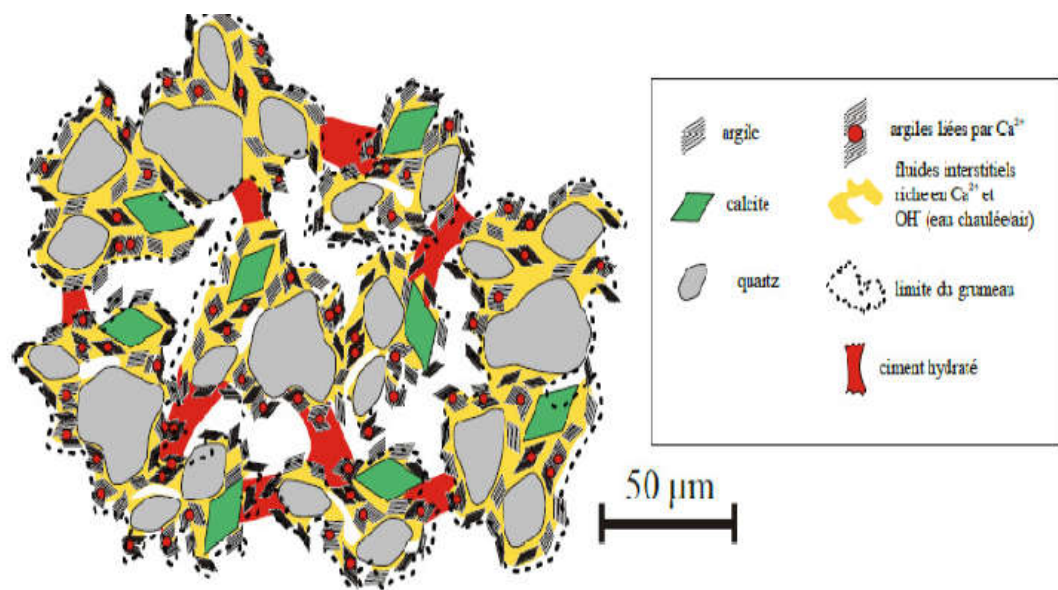


Dans le cas des smectites, l'effet immédiat de la substitution du sodium par du calcium est la réduction du potentiel expansif de ces argiles.

- des cations de bordure. Sur les bordures d'un cristal, les charges ne sont plus équilibrées. Il apparaît alors des fonctions SiOH et AlOH. Ces fonctions sont déstabilisées en milieu basique et constituent alors une source supplémentaire de sites de fixation pour l'ion calcium. (Cabane, 2004)

### 1.5.2 Floculation et agglomération

L'échange cationique entraîne une modification de la densité de la charge électrique superficielle des particules argileuses. Ce phénomène s'explique par la formation de ponts  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou  $\text{CaOH}^+$  entre les feuillets d'argile. Les feuillets sont déstructurés à cause des interactions électrostatiques, et une structure plutôt sphérique s'instaure (figure 1.10). Cette floculation - agglomération change la texture de l'argile et améliore la consistance des argiles (indice de plasticité) (Cabane, 2004).



**Figure 1.10:** Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004).

### 1.5.3 Réaction pouzzolaniques

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations  $\text{Ca}^{2+}$  et anions  $\text{OH}^-$ ) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu



basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des aluminates de calcium hydraté (CAH), des silicates de calcium hydratés (CSH) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (CASH).

La réaction pouzzolaniques de base est illustrée par les équations suivantes :

- $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{++} + 2(\text{OH})^-$
- $\text{Ca}^{++} + \text{OH}^- + \text{SiO}_2$  (silicates d'argile soluble)  $\rightarrow$  (C-S-H). Silicates de Calcium Hydratés
- $\text{Ca}^{++} + \text{OH}^- + \text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminates d'argile solubles)  $\rightarrow$  (C-A-H). Aluminates de Calcium Hydratés

#### 1.5.4 Carbonatation

La chaux réagit avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique pour former la calcite  $\text{CaCO}_3$ . Cette réaction provoque une réduction des propriétés liantes à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolaniques (Diamond et Kinter, 1965; Khattab, 2002; Cabane, 2004).

### 1.6 Les ajouts minéraux

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique.

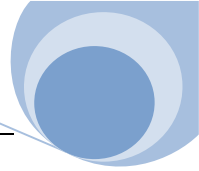
#### 1.6.1 Pouzzolanes

Les Pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble) capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes. (Ramezani pour, 1987 et Izemmouren, 2016).

Les avantages du remplacement partiel de la chaux par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage. Ils permettent la réduction de la quantité de chaux utilisée

#### ✓ Propriétés hydrauliques

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.



### ✓ Propriétés physiques de remplissage

En plus de leur effet pouzzolaniques, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

- il y a plusieurs paramètres influençant sur l'activité pouzzolaniques :
  - La finesse des pouzzolanes,
  - Le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange,
  - La durée et la température de cure.

### 1.6.2 Laitiers de hauts fourneaux

Ce sont des sous-produits de fabrication de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke.

On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent.
- Le laitier vitrifié (granulé) obtenu par refroidissement rapide.

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95 % à 97 % des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre, le tableau (1.1) montre l'analyse chimique de quelque pays (Behim, 2005).

**Tableau 1 .1** : Composition chimique du laitier de haut fourneau D'après (Behim, 2005).

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO <sub>2</sub>	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO <sub>3</sub> , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO <sub>2</sub>	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na <sub>2</sub> O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K <sub>2</sub> O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
<b>Total</b>	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2



### 1.6.3 Poudre de verre

#### 1.6.3.1 Définition

En générale le verre est un matériau transparent, homogène et fragile il résiste au feu et au contact de tous les liquides et solides, c'est un solide non cristallin (amorphe) qui ne présente pas l'ordre à longue distance c'est un état particulier de la matière (état vitreux).

#### 1.6.3.2 Composition chimique du verre

En fonction de l'usage auquel elle est destinée. On distingue, selon le domaine d'applications, plusieurs grandes familles de verres. En général, les principales matières premières se classent en trois catégories :

- **Les vitrifiants** : sont des éléments de bases qui créent la structure vitreuse.
- **Les fondants** : permettent de fondre les vitrifiants à des températures acceptables.
- **Les stabilisants** : permettent d'empêcher la détérioration dans le temps des verres fondus.

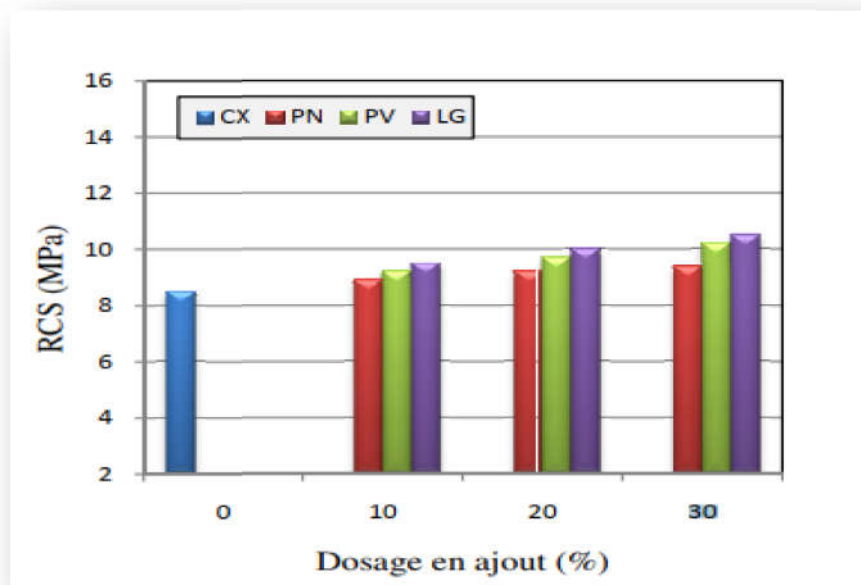
- **Tableau 1.2.** Composition chimiques de quelques verres (Internet)

Composants (en %)	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	PbO
Verre plat	72.5	–	1.5	1.3	0.3	9.3	3	–
Verre à bouteilles	73	–	1	15	–	10	–	–
"Pyrex" (borosilicates)	80.6	12.6	2.2	4.2	–	0.1	0.05	–
Fibre de verre	54.06	8.0	14.8	0.6	–	17.4	4.5	–
"Cristal"	55.5	–	–	–	11	–	–	33

### 1.7 Effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des briques de terre.

Plusieurs études et recherches expérimentales ont été menées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation dépend du type de sol, le dosage et la combinaison des stabilisants, et le temps de cure.

Izemmouren (2016), a étudié les effets du dosage des ajouts minéraux (pouzzolane ; poudre de verre et laitier) sur la résistance mécanique des briques de terre comprimée stabilisée par différents dosages en chaux et compactées à 10 MPa et conservées au laboratoire à température ambiante jusqu'à 28 jours. Les résultats montrent que

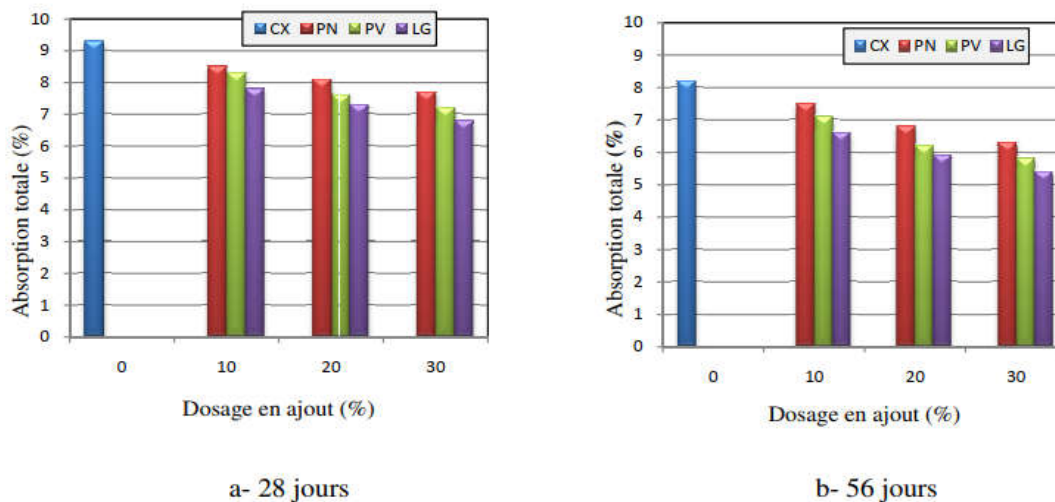


**Figure 1.11 :** Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression

La résistance à la compression sèche augmente en fonction du dosage en ajouts. La résistance à la compression des briques avec ajouts est supérieure à celle des briques sans ajouts. Ces résultats significatifs témoignent de l'effet bénéfique de ces ajouts sur l'amélioration de la résistance à la compression des ajouts.

En plus, Izemmouren (2016), a conclu d'une manière générale qu'il y avait une diminution de

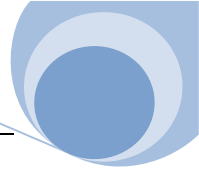
l'absorption totale avec l'augmentation de la teneur en ajouts et temps de cure Figure 1.12. Cette diminution témoigne de la formation de nouveaux hydrates qui remplissent les vides.



**Figure 1.12 :** Influence du dosage en ajout et temps de cure sur l'absorption totale

### 1.8 Effet des différents ajouts sur les propriétés du mortier de terre

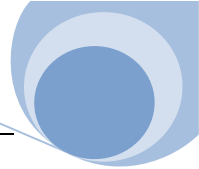
Les mortiers de terre utilisent de l'argile comme liant, bien que les stabilisants chimiques et les liants minéraux comme la chaux ou le ciment soient également recommandés par plusieurs auteurs (Ashurst et Ashurst, 1995; SAZS 724, 2001; Minke, 2006). Pour ces auteurs, ces ajouts peuvent améliorer certaines propriétés, telles que la résistance et la durabilité. Mais ces avis ne sont pas largement acceptés, en particulier en ce qui concerne l'utilisation du ciment, qui est le stabilisant le plus courant. En effet, certaines études indiquent que l'ajout de ciment aux enduits de mortier de terre n'est pas approprié dans le cas des bâtiments en terre (Warren, 1999) et représente une erreur énorme qui engendre des problèmes majeurs à long terme (McHenry, 1984 ; Guelberth et Chiras, 2003). Jimenez Delgado et Guerrero (2006) et Walker et al. (2005) sont plus spécifiques et déconseillent l'utilisation de mortiers à haute teneur en ciment dans les murs de terre non stabilisés. Néanmoins, il est souvent noté dans la littérature que l'utilisation de stabilisants minéraux, ciment compris, est une pratique courante. Malgré cette discussion (et probablement à sa racine), les effets que les liants minéraux peuvent avoir sur les caractéristiques des mortiers de terre sont encore mal étudiés. Ce tableau résume quelques études sur l'utilisation des différents ajouts soit minéral ou naturelle comme stabilisants aux renforcements dans les mortiers de terre.



**Tableau 1.3 : Effet des différents ajouts sur les propriétés du mortier de terre.**

Auteurs	Les essais	Stabilisants	Renforcements	Résultats
( Danso et al,2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>*durabilité</li> <li>*la résistance à la compression,</li> <li>*la résistance à la traction par fendage,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*5% de ciment en poids; 0, 5, 10 et 15% de chaux en poids</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*0,2, 0,4, 0,6 et 0,8% de fibres de coco en poids;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* L'ajout de 0,2% de fibres de noix de coco et de 5% de chaux dans le mortier de sol-ciment a gagné en densité</li> <li>* la fibre de coco à 0,2% et la chaux à 5% offrent de meilleures propriétés de résistance du mortier.</li> </ul>
(Gomes et al,2018 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>*réparation et la protection des murs en pisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*0%, 5%, 10% et 15% de chaux aérienne hydratée en poudre</li> <li>*chaux hydraulique</li> <li>*Ciment Portland CEM II BL 32,5 N ou ciment naturel (NC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*0% ou 5% de fibres de chanvre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*L'addition de fibres de chanvre (5% de la masse de la terre) avait mieux mais présentaient toujours des limites pertinentes.</li> <li>*Les fibres ont diminué le retrait de séchage des mortiers, ce qui signifie que sans volume diminue, aucune contrainte interne n'est générée et, par conséquent, la fissuration diminue; cela est très bénéfique pour un mortier de réparation ou un rendre.</li> </ul>
( Gouny et al ,2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* les essais de double cisaillement</li> <li>*la résistance à la compression,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*liant géopolymère</li> <li>*Trois des types d'grégaats: deux types de sable et un type de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Le bois</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Il est possible d'utiliser un liant géopolymère pour rendre stable assemblage de bois et terre brique.</li> <li>*L'ajout d'agrégats au liant géopolymère initial</li> </ul>





		déchets de verre.		formulation facilite la création d'un mortier adapté à construction. Ce mortier montre une meilleure compression par rapport au liant standard,
( Perrot et al,2018 )	* la résistance mécanique de la terre	* un dispersant hexamétaphosphate (HMP) * sable fin et grossier	-	* l'élargissement d'une la distribution granulométrique des particules augmente la densité sèche des échantillons et donc leur résistance à la compression * le mélange avec HMP présente une résistance mécanique plus élevée. Cette augmentation pourrait être due à une meilleure dispersion des particules d'argile

### 1.8 Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général sur la construction en terre. L'ensemble des processus physico-chimiques engendrés par l'ajout de la chaux dans le sol a été présenté. Ensuite, l'effet des différents ajouts sur les résistances mécaniques et durabilité des mortiers de terre crue, ont été bien analysées dans les études antérieures. Ces études montrent que certains ajouts peuvent améliorer ces caractéristiques. Malgré ces études reste l'effet que les liants minéraux peuvent avoir sur les caractéristiques des mortiers de terre sont encore mal étudiés. En effet, dans le cadre du présent travail, une étude est réalisée pour comprendre l'effet de la pouzzolane naturelle, laitier et la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers de terre crue.

# Chapitre 02 : Caractéristiques des matériaux et méthodes d'essais



## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, on présentera aussi l'ensemble des formulations à étudier, ainsi que les procédures des essais. En deuxième lieu nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et durabilité du mortier de terre crue

## 2.2 Matériaux utilisés

Dans ce travail, nous avons cherché à valoriser trois matériaux d'origine et de nature différente comme ajouts avec la chaux pour stabiliser le mortier de terre crue : la pouzzolane naturelle, le laitier granulé de haut fourneaux et la poudre de verre.

### 2.2.1 Sol

#### 2.2.1.1 Origine du sol

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



**Figure.2.1** : le sol



### 2.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol :

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. (Houben, 1994)

#### a) Densité des grains (NF P 94-053)

La masse volumique de l'éprouvette traduit dans une large mesure ses propriétés techniques. Les résultats des essais sont donnés dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1** la Masses Volumiques du sol.

Echantillon	Masse volumique absolue $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Sol de Biskra	2,54	1,185

#### b) Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Sont des teneurs en eau pondérales, caractéristique du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action de variation de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers les tamis de 400 $\mu$ m. Les limites utilisées sont :

- Limite de liquidité notée WL : limite de liquidité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique)
- Limite de plasticité WP : limite de plasticité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide).
- Indice de plasticité noté IP : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et plasticité :

$$IP = WL - WP.$$



figure.2.2: Détermination de WL et WP.

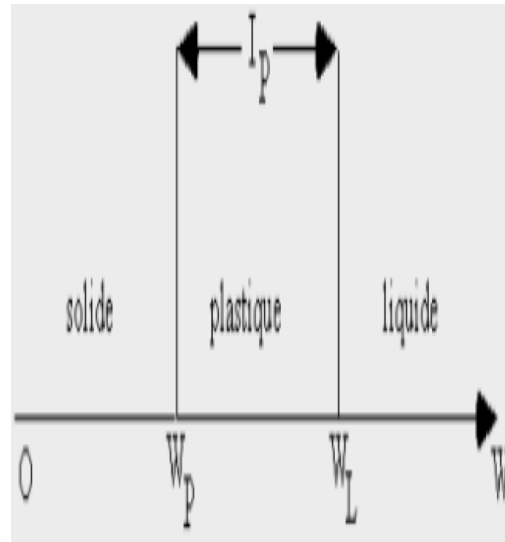


Figure 2.3 : Limites d'Atterberg.

Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Limites d'Atterberg de sol.

Limites d'Atterberg, (%)			
	Limite de liquidité WL	Limite de plasticité WP	Indice de plasticité IP
Sol	36.5	17.96	18.54

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (Figure 2.4). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité

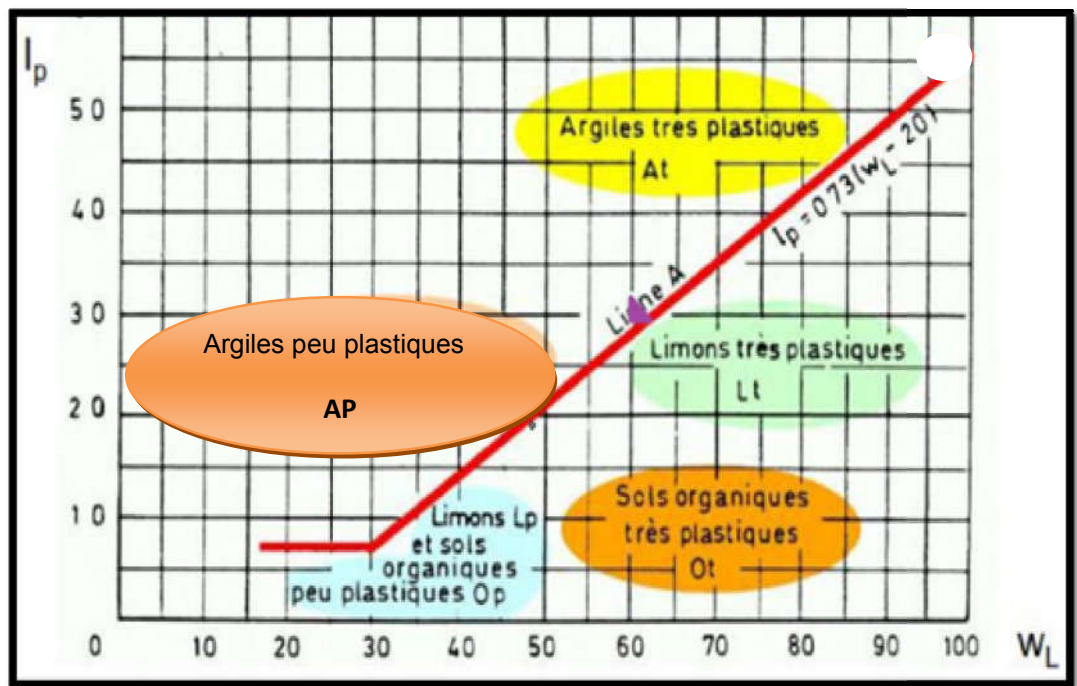


Figure 2.4: Classification des sols étudiés sur le diagramme de Casagrande.

Suivant le diagramme nous pouvons dire que le sol est une argile peu plastique.

### c) Composition granulaire

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais :

- L'analyse granulométrique selon les normes NF P18-560
- la sédimentométrie selon les normes NF P 94-057

#### L'analyse granulométrique par sédimentométrie (NF-P94-057) :

Cet essai consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à  $80 \mu\text{m}$ , la séparation se fait par tamisage. Pour les fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ), on doit pratiquer l'essai de sédimentométrie.

Les résultats des essais sont présentés sur la figure 2.5





On appelle **La valeur de bleu**, notée VBS et exprimée en grammes de bleu par 100g de sol. La valeur VBS est utilisée aussi pour la classification des sols. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.4

$$VBS = \frac{B}{Ms} \times 100 \times C$$

B: Masse du bleu introduite (grammes);

Ms: Masse de l'échantillon à l'état sec (grammes).

C: concentration de la solution du bleu (0,1g/l)

**Tableau.2.3:** Classification des sols d'après Philipponat.

La valeur de bleu	Type de sol
VB < 0,2	Sols sableux
0,2 < VB < 2,5	Sols limoneux
2,5 < VB < 6	Sols limoneux argileux
6 < VB < 8	Sols argileux
VB > 8	Sols très argileux

**Tableau 2.4 :** Valeur du bleu de méthylène.

Echantillon	Valeur du Bleu V <sub>BS</sub>	Classification du sol
Sol de Biskra	6,5	Sols argileux





## 2.2.2 Sable concassé

### 2.2.2.1 Caractéristique physique du sable

Le sable utilisé dans tous les mélanges est un sable concassé (0/3) provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol.



**Figure 2.6** : sable concassé

#### **La masse volumique (NF P 18 555) :**

##### **Masse volumique apparente :**

Elle a pour but de déterminer la masse volumique apparente **papp** d'un sable sec.

##### **Masse volumique absolue :**

Détermination de masse volumique absolue **pabs** d'un sable sec par la méthode de l'éprouvette graduée, cette dernière est basée sur la lecture de volume

#### **Analyse granulométrique par tamisage (NF P 18 560) :**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs de différentes familles de grains qui constituent l'échantillon.



Figure 2.7 : Essai de l'analyse granulométrique du sable concassé.

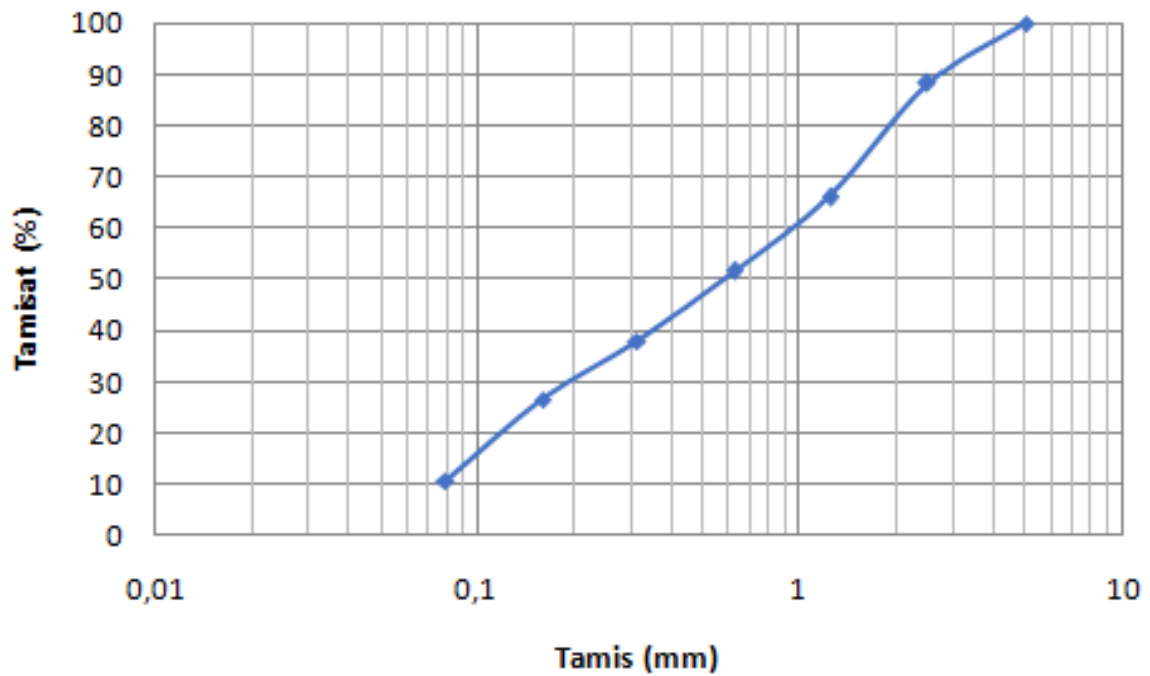


Figure 2.8: Courbe granulométrique de sable concassé.



### Module de finesse (NFP 18-304) :

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 -

1,25 - 2,5 - 5 ... mm

$$MF = 1/100 * \sum (\text{Refus cumulés en \% des tamis } \square 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 \dots \square)$$

**Tableau.2.5:** les Catégorie des Sables.

Sable Très fin	Sable Fin	Sable Moyens	Sable Grossier
Mf de 1 à 1,5	Mf de 1,5 à 2	Mf de 2 à 2,5	Mf > 2,5

Selon la classification ci-dessus, les sables concassés ont été classés comme des Sable Moyens

### L'équivalent de sable (NFP 18-598)

L'équivalent de sable est consisté à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

**Tableau 2.6 :** Les caractéristiques physiques du sable concassé

MV <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	MV <sub>abs</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Equivalent de sable (%)		MF
		visuel	au piston	
1,281	2.5	55,17	45,51	2 .3

### 2.2.3 La chaux

Tous les types de chaux sont à employer en principe dans la stabilisation du matériau terre destiné à la construction.

La composition chimique de la chaux vive, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le tableau 2.7

**Tableau 2.7 :** Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive  
(Saida ; Izemmouren, 2016).

Désignation	Caractéristiques physiques (g/cm <sup>3</sup> )		Analyse chimique (% massique)							
	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Valeurs	1.89	0.608	82.77	10.63	3.27	1.35	1.88	0.11	0.15	0.06



**Figure 2.9:** la chaux

## 2.2.4 Les ajouts minéraux

Tableau 2.8 : Les caractéristiques physiques des ajouts minéraux.

	Masse volumique apparente $\text{g/cm}^3$	Masse volumique absolue $\text{g/cm}^3$	La surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{Kg}$ )
pouzzolane naturelle	1.19	3,205	420
Poudre de verre	1.42	2,55	400
Laitier	1,118	2,967	450



Figure 2.10: Pouzzolane broyé



Figure 2.11 : Poudre de verre



Figure 2.12: laitier



## 2.3 Conduite de l'essai

### 2.3.1 Matériel spécifique

Les éprouvettes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$ ) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme objet de notre recherche, le démoulage de moule prismatique est effectué par ouverture du moule (dévissage des boulons).



**Figure 2.13:** Le moule utilisé pour le moulage

### 2.3.2 Préparation des mélanges

D'après Michel (1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à  $63^\circ\text{C}$ , les matériaux (sol+sable +chaux+ ajouts minéraux) sont d'abords mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres à une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant cinq minutes. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes environ.



**Figure 2.14:** mélange et malaxeur

### **Codification des mélanges**

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette mémoire afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules

**T** : mortier stabilisé par la chaux.

**P** : mortier stabilisé par la chaux et la pouzzolane naturelle

**V** : mortier stabilisé par la chaux et la poudre de verre

**L** : mortier stabilisé par la chaux et le laitier

**Mc** : la résistance à la compression

**Mt** : la résistance à la traction

**Cb** : coefficient d'absorption



**2.3.3 Composition des mélanges**

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le tableau

**Tableau 2.9** Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Sol (%)	Sable (%)	Chaux (%)	Pouzzolane (%)	Poudre de Verre (%)	Laitier (%)	L'eau (%)
60	30	10	-	-	-	28
60	30	8	2	-	-	
			-	2	-	
			-	-	2	
60	30	6	4	-	-	
			-	4	-	
			-	-	4	
60	30	4	6	-	-	
			-	6	-	
			-	-	6	

**2.3.4 Mode de conservation :**

La résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure de 8 jours est indispensable.

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

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à assurer son étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant Les blocs couverts sont conservés à l'étuve à une température  $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 8 jours





**Figure 2.15:** conservation des blocs

## 2.4 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été limitées à des essais de compression et de traction par flexion.

### 2.4.1 Essai de compression simple (NF XP- P 13 901)

Pour nous essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques (4x4x4) cm<sup>3</sup>, à l'aide d'une presse. La résistance à la compression est donnée par la formule

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

R<sub>c</sub> : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en mm<sup>2</sup>

La résistance à la compression moyenne des blocs est la moyenne arithmétique des résistances à la compression de 6 essais réalisés sur des échantillons d'une même formulation.

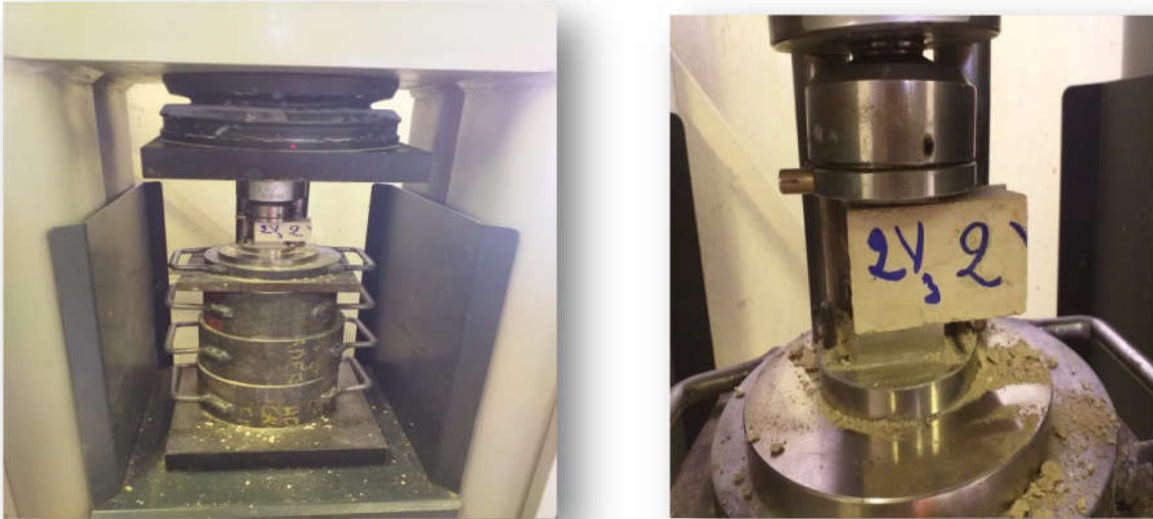


Figure 2.16: Essai de compression

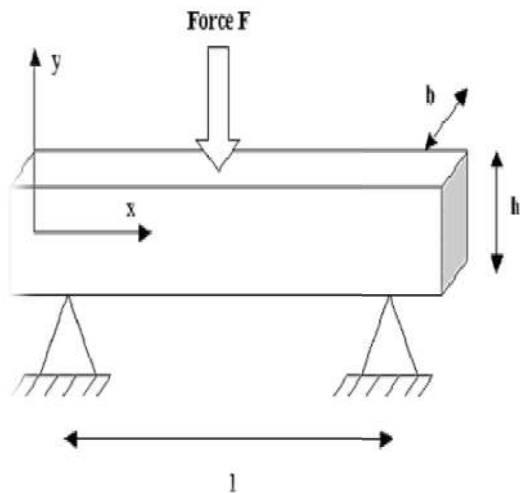
#### 2.4.2 Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5)

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup>. Pour mesurer la résistance en traction par flexion on utilisera la méthode de 3 points (flexion trois point) (Figure).

La résistance en flexion (en N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$f_t = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

- $F_t$  : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.
- $d_1$  et  $d_2$  : sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.
- $F$  : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.
- $L$  : est la distance entre les appuis, en millimètres.



**Figure 2.17** : Schéma du montage de flexion 3 points



**Figure 2.18**: Essai de flexion

## 2.5 Essai de la durabilité

### 2.5.1 Absorption capillaire (NF XP- P 13 901)

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901.

Après dessécher la brique jusqu'à une masse constante,

- laisser stabiliser au laboratoire durant 6 heures, puis en peser la brique soit :  $P_0$
- Immerger la face lisse de parement de façon qu'elle soit 5 mm (figure 2.19).

Le coefficient d'absorption d'eau  $C_b$  correspond au taux d'absorption après un temps égal 10 min. Le coefficient  $C_b$  d'absorption d'eau est exprimé par la formule suivante:

$$C_b = \frac{100 * (M_h - M_d)}{S\sqrt{T}}$$

Avec:  $M_h - M_d$  : est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai ;

$S$ : surface de la face immergée, en centimètres carrés ;

$T$ : est la durée d'immersion du bloc en minutes.

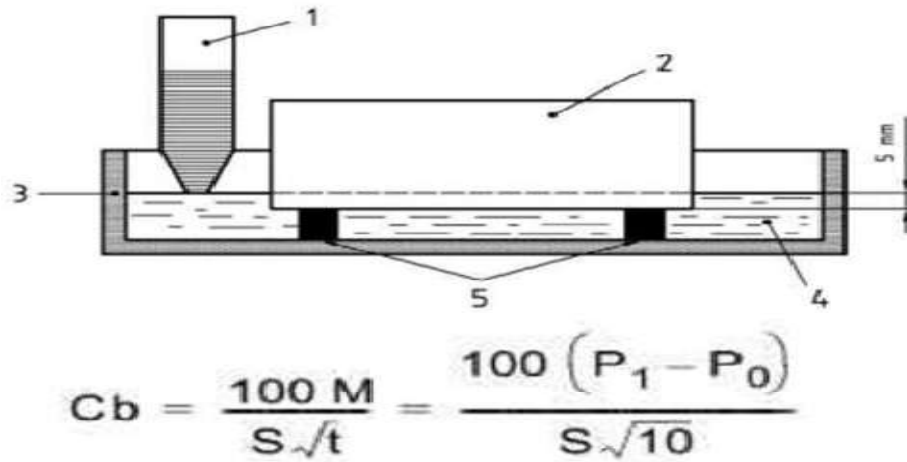


Figure.2.19 : Schéma de l'essai d'absorption



Figure 2.20: Essai d'absorption par capillaire

### 2.5.2 Absorption totale d'eau :

L'essai consiste à poser des échantillons dans un bac à eau pendant 24 h et on mesure l'augmentation de la masse des échantillons ( $P_h$ ). L'indice A de l'absorption totale de l'eau de chaque bloc est conventionnellement exprimé par la formule :

$$A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

- **Ph** : poids de l'échantillon à l'état humide.
- **Ps** : poids de l'échantillon à l'état sec.



**Figure 2.21:** Essai d'absorption totale

### 2.5.3 Gonflement

La mesure du gonflement se fait selon la procédure suivante (norme XP 13- 901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure
- Mesurer la distance entre plots : L0
- Placer les blocs dans un bac d'eau

Après 48 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : L1

- L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Dl_g \text{ (mm/m)} = (L1-L0) / L0}$$

L0: la distance avant immersion.

L1: la distance après immersion.

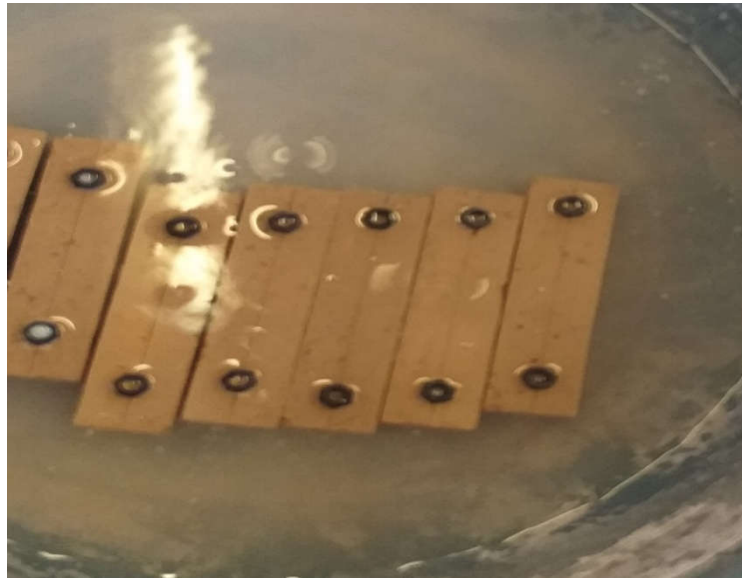


Figure 2.22: Essai de gonflement

#### 2.5.4 Résistance à l'abrasion

Après la conservation jusqu'à une masse constante, en laisser stabiliser durant 24 heures au moins, peser la brique soit :  $m_0$  (en grammes).

- Poser la brique sur un plan horizontal pour le brossage, la brosse métallique sera posé sur la brique, puis en brosser la face de la brique a raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute (soit 60 aller-retour) sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation.

A la fin du brossage la brique est nettoyer les éléments qui sont détacher puis un nouveau peser soit :  $m_1$ .

De cet essai est déduit le coefficient d'abrasion ( $Ca$ ) de la brique qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion.

$$Ca(\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S}{m_0 - m_1}$$

- $Ca$  : coefficient d'abrasion de la brique,
- $S$  : Surface d'abrasion de la brique en  $\text{cm}^2$ ,
- $m_0$  : masse initiale de la brique avant abrasion en gramme
- $m_1$  : Masse de la brique après l'essai d'abrasion en gramme.

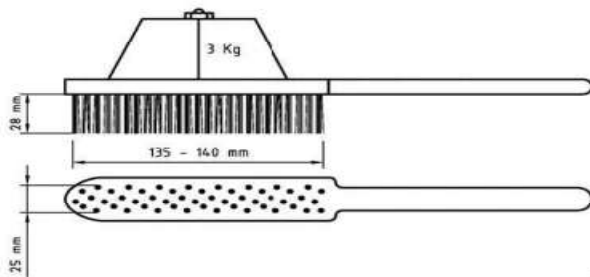


Figure-12—Brosse d'acier-pour-essai-d'abrasion[]

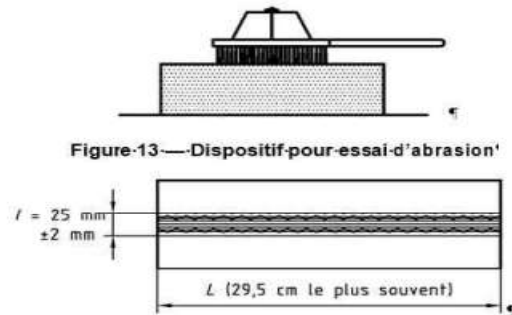


Figure-14—Calcul-de-la-surface-de-brossage[]

→ Mesure de la perte de matériau

Figure.2.23 : Essai d'abrasion.

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des mortiers de terre qui développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable concassé, la chaux et les ajouts. Les trois ajouts minéraux étudiés sont très différents. D'un point de vue de leur réactivité, ces trois matériaux présentent aussi des potentiels très différents, spécifiques à leur nature minéralogique : la pouzzolane et la poudre de verre auront certainement des propriétés pouzzolaniques alors que le laitier est hydraulique.

La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des mortiers dans ce chapitre

# Chapitre 03

## Résultats et discussions



### 3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude des effets d'ajouts minéraux notamment l'effet de la nature et du dosage de l'ajout minéral sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers de terre crue.

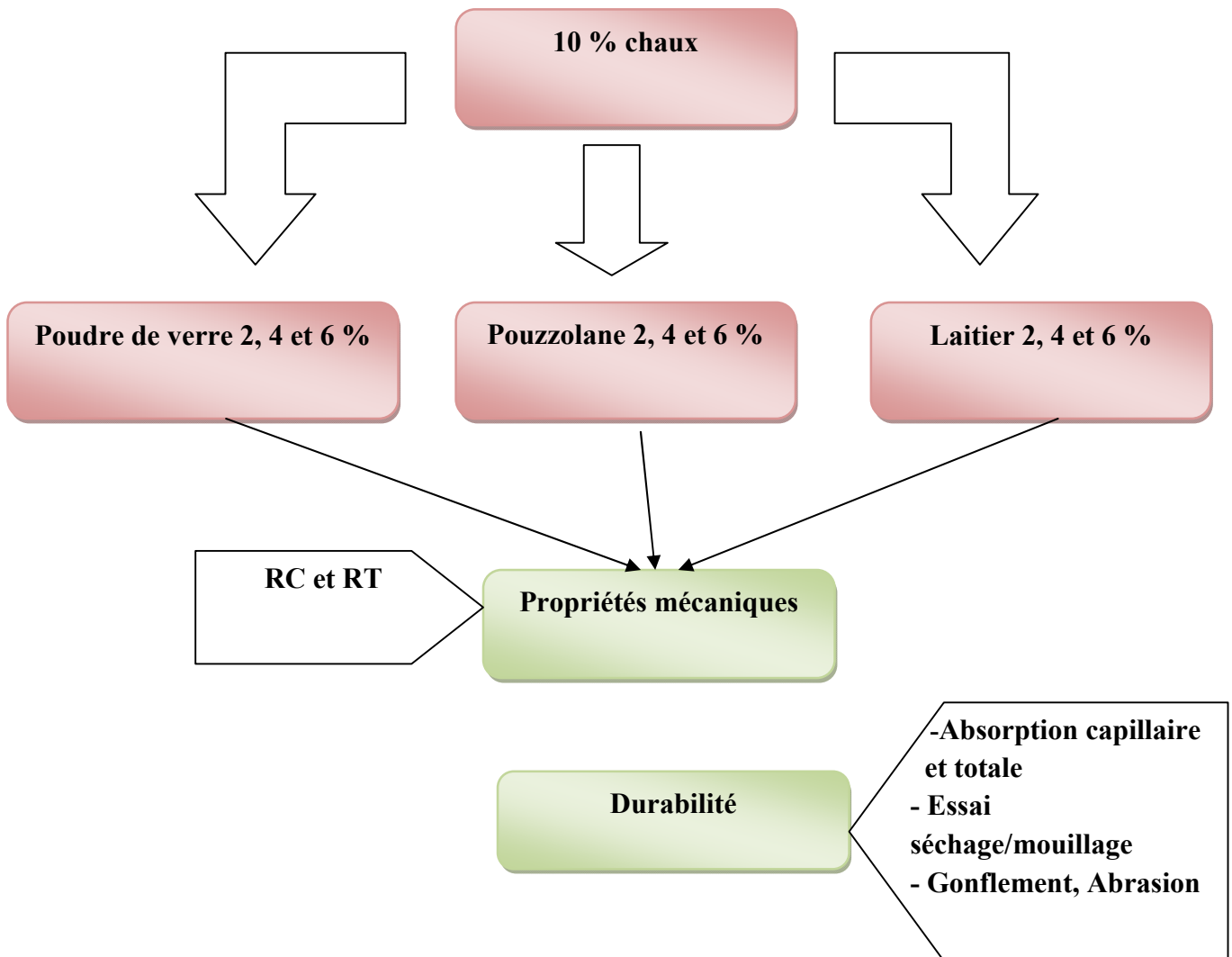
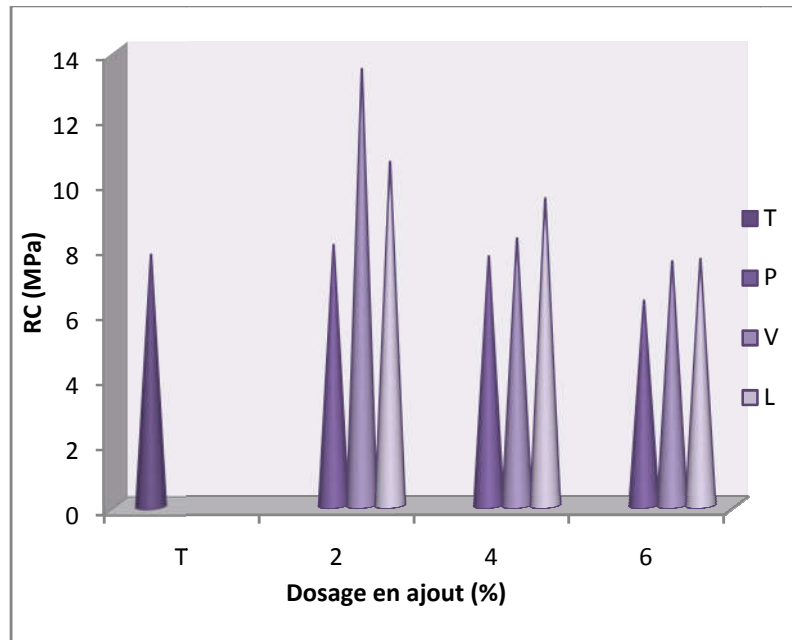


Figure 3.1 : Programme expérimental.

## 3.2 Résistances mécaniques

### 3.2.1 Résistance à la compression simple



**Figure 3.2** Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression

La résistance à la compression d'un mortier est peut-être l'un des propriétés de la technologie la plus importante.

L'analyse des courbes (**figure 3.2**) montre que :

- Une résistance relativement augmenté avec l'augmentation du pourcentage des ajouts minéraux (poudre de verre ; pouzzolane ; laitier) jusqu'à 2%, cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents dosages en ajouts.
- Les valeurs de résistance à la compression varient entre :
  - ✓ 6,32 MPA et 8,03 MPA (pouzzolane)
  - ✓ 7,53 MPA et 13,43 MPA (poudre de verre)
  - ✓ 7,6 MPA et 10,58 MPA (laitier)
- L'augmentation de la Rc est de l'ordre de 7.3 %, 42.44 % et 26.93 % pour l' ajout de (2 %) de pouzzolane, poudre de verre et laitier) respectivement.
- Poudre de verre donne les meilleures résistances en compression par rapport à la pouzzolane et au laitier.

### 3.2.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction demeure relativement faible, et c'est parce qu'il a utilisé des matériaux sont non-résistants à la traction. Mais il est nécessaire de connaître le comportement à la traction. Par ailleurs, les constructions en terre sont aussi sollicitées en traction et en cisaillement dans le cas de vent important, de séisme.

L'effet de la variation du dosage des ajouts sur la résistance à la traction est présenté sur la figure 3.3.

D'après cette figure :

- Une résistance relativement élevée avec l'augmentation du pourcentage des ajouts minéraux (poudre de verre, pouzzolane et laitier) jusqu'à 2 %. cet optimum donnera la meilleure résistance. Par contre, pour une gamme de 4% à 6 % d'ajout, il y a une chute de RT. Dans ce cas l'ajout de P, L et V n'aura pas suffisamment de la chaux pour la réaction pouzzolanique.
- L'augmentation de la  $R_t$  est de l'ordre de 9.05 %, 17.22 % et 13.33 % pour l'ajout de (2 %) de pouzzolane ; poudre de verre et laitier respectivement.
- La valeur la plus élevée de la résistance à la traction est 2.67 MPA pour poudre de verre à 2 %.

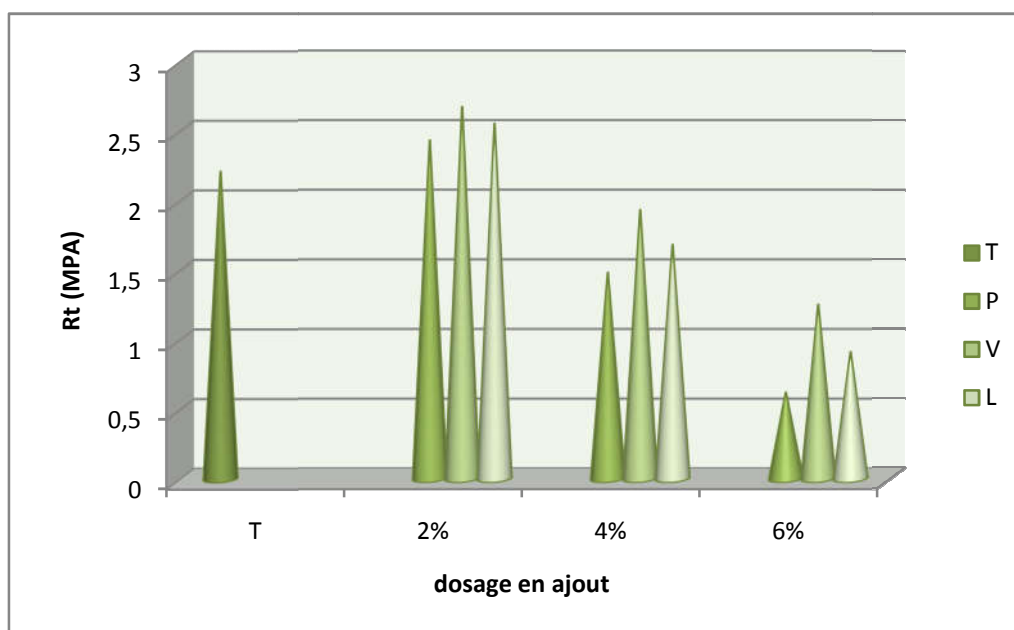


Figure 3.3 : Influence du dosage en ajout sur la résistance à la traction

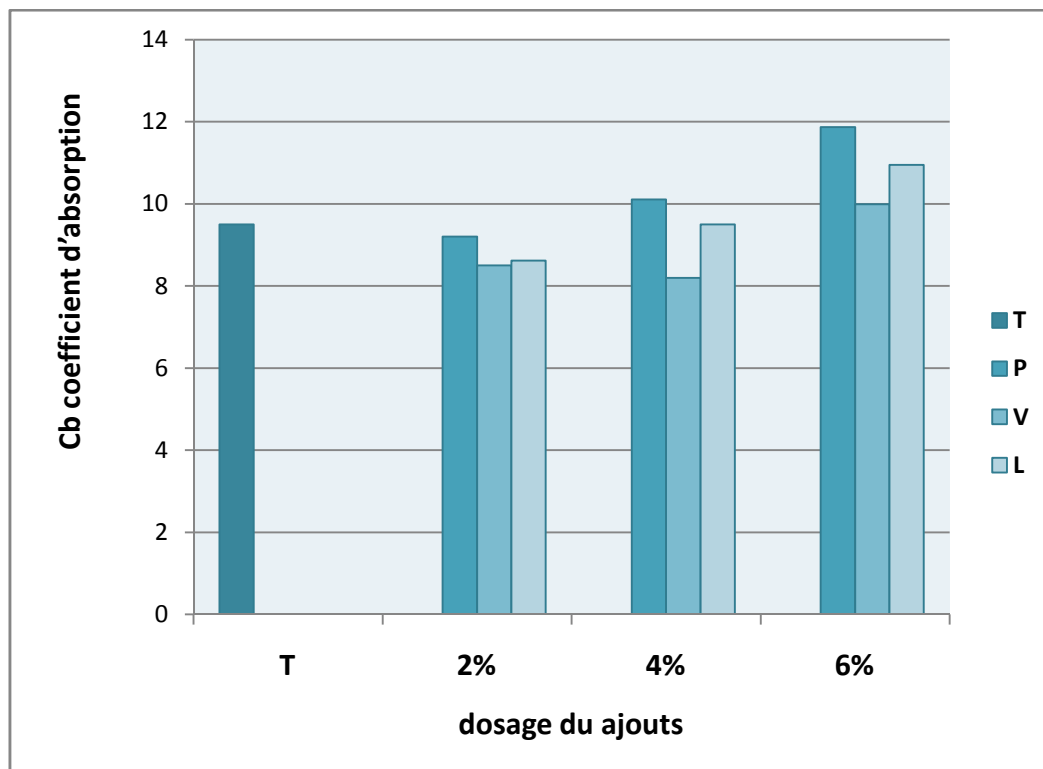


### 3.3 Essai de la durabilité

#### 3.3.1 Absorption capillaire

- L'absorption relativement diminue avec l'augmentation du pourcentage des ajouts minéraux (poudre de verre, pouzzolane et laitier) jusqu'à 2%, cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents dosages en ajouts.
- La diminution du coefficient d'absorption est de l'ordre de 3.15 %, 10.52 % et 9.26 % pour l'ajout de (2 %) de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement.

La figure (3.4) montre que le dosage de 2% de poudre de verre donne la meilleure valeur de coefficient d'absorption capillaire (8.5 (g/cm<sup>2</sup>))



**Figure 3. 4 :** Changement du coefficient d'absorption capillaire en fonction du dosage des ajouts

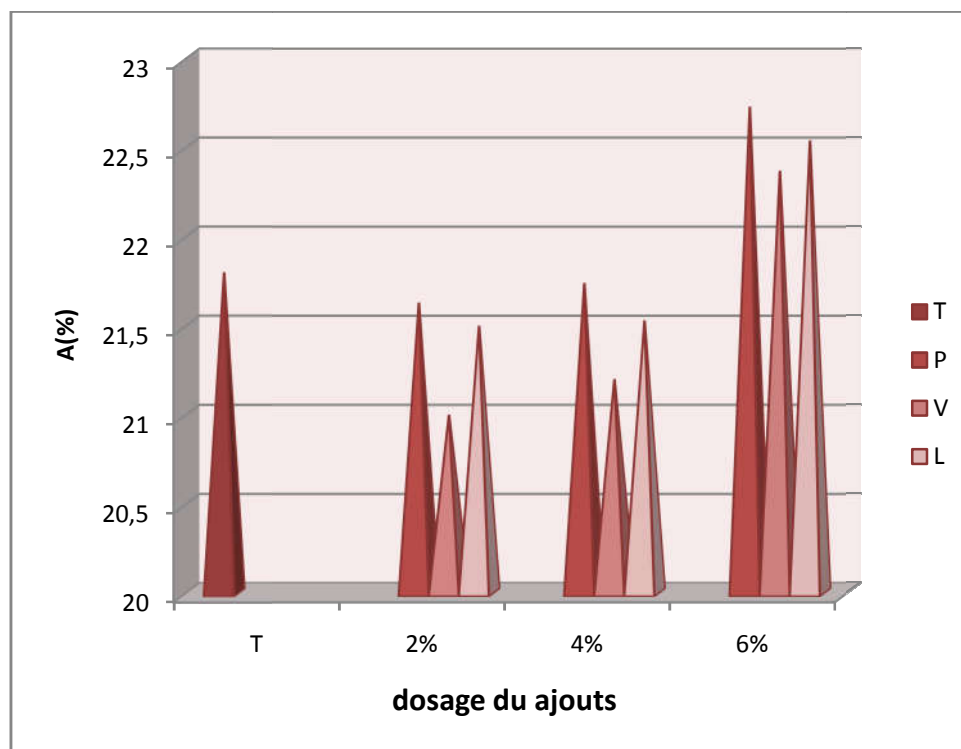
### 3.3.2 Absorption totale d'eau

L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le Contrôle du volume total des vides

- La Figure 3.5 montre que l'absorption d'eau totale diminue avec l'augmentation de dosage des ajouts jusqu'à 2%, cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents dosages en ajouts.

On peut constater la diminution de l'absorption d'eau totale d' environ 0.77%, 1.97% et 1.37% dans l'ajout de (2 %) de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement.

La plus faible valeur de l'absorption totale de l'ajout est enregistrée pour le cas de 2% de poudre de verre (de l'ordre de 21%).



**Figure 3.5 :** Changement du coefficient d'absorption totale en fonction du dosage des ajouts.



### 3.3.3 Gonflement

Les résultats de la figure 3.6 nous montrent une variation du gonflement avec la teneur des ajouts.

Après avoir été complètement immergé pendant une période laquelle le poids des éprouvettes a été stabilisé, les résultats nous sont apparus comme suit:

Dans l'éprouvette de référence (témoin), c'est-à-dire que la quantité ajoutée est de 0%, la valeur de gonflement était de 3,73 mm / m, alors qu'elle diminuait à 1,503 mm / m lorsque les échantillons contenant 2 % de poudre de verre et à 2,22 mm / m lorsque les échantillons contenant 2 % de laitier et à 2,533 mm / m lorsque les échantillons contenant 2 % de pouzzolane.

La plus faible valeur de gonflement est enregistrée pour le cas de 2% de poudre de verre (de l'ordre de 1,503 mm/m).

On peut constater la diminution de gonflement d' environ 32,09 % ; 59,70% et 40,48% dans l'ajout de (2 %) de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement.

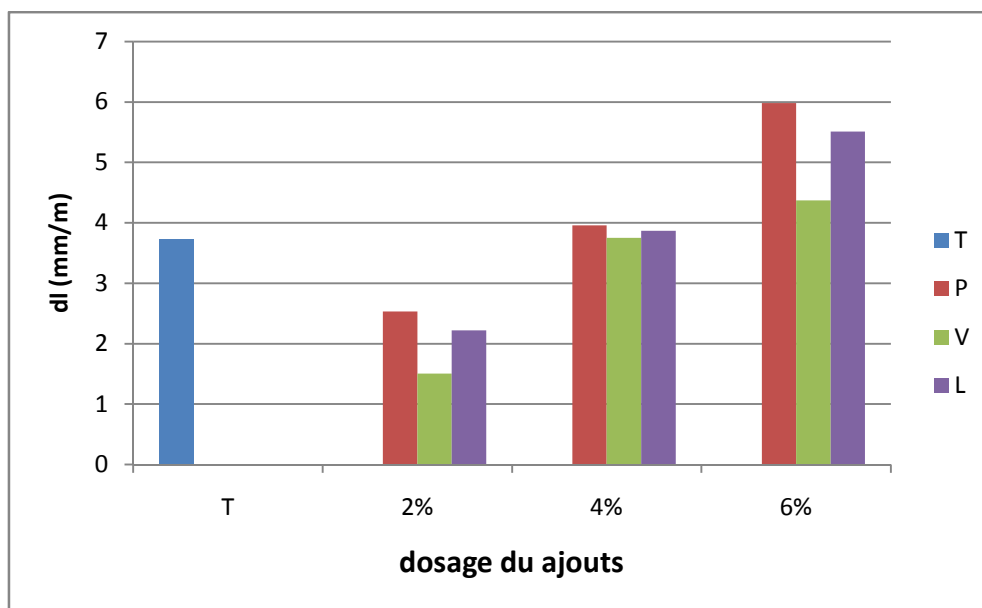


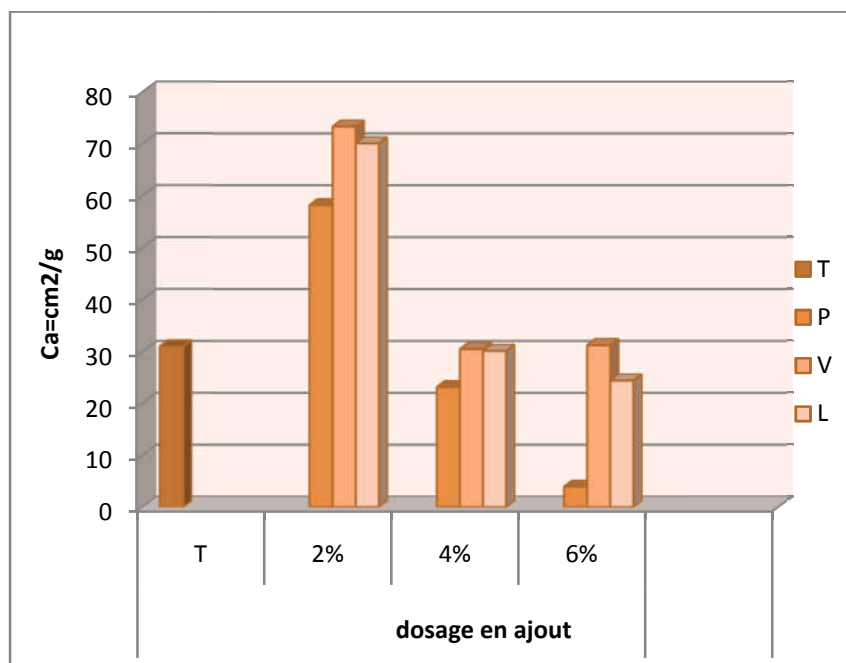
Figure 3. 6 : Changement du gonflement en fonction du dosage des ajouts

### 3.3.4 Résistance à l'abrasion

- D'après l'analyse de la Figure 3.7, on a remarqué que le coefficient de l'abrasion augmente avec l'augmentation du dosage des ajouts jusqu' à 2%. cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents dosages en ajouts.

L'augmentation de l'abrasion est de l'ordre de 46.82 %, 57.79 % et 55.84 % pour l'ajout de (2%) de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement.

Les valeurs varient entre (3.93 et 73.33 cm<sup>2</sup>/g), Où la plus grande valeur du coefficient d'abrasion et obtenue par 2 % de poudre de verre.



**Figure 3. 7 :** Changement du coefficient d'abrasion en fonction du dosage en ajout.



### 3.4 Conclusion

Le présent chapitre était consacré à l'étude de l'effet des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortier , Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et le degré d'insensibilité à l'eau du mortier de terre.

L'étude expérimentale nous a laissé d'obtenir les points suivants :

- ✓ la teneur 2% des ajouts minéraux donne les meilleures résistances (traction et compression cette amélioration est de l'ordre de 7.3 %, 42.44 % et 26.93 % pour l' ajout de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement pour la résistance à la compression et de 9.05 %, 17.22 % et 13.33 % pour la résistance à la traction.
- ✓ Le dosage de 2% de poudre de verre donne la meilleure valeur de résistance mécanique et durabilité pour tous les ajouts.
- ✓ La plus faible valeur de l'absorption totale de l'ajout est enregistrée pour le cas de 2% de poudre de verre (de l'ordre de 21%).
- ✓ Les meilleures valeurs des résistances et durabilité du mortier sont obtenues par l'ajout de poudre de verre suivis de laitier puis de pouzzolane.





## Conclusion Générale

Depuis les premières civilisations l'homme a utilisé les techniques de construction à base de la terre crue. Elle est significative dans la construction car sa disponibilité.

Parmi le coté positive de la construction en terre crue, elle permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver.

Dans une maçonnerie, les briques de terre comprimée ou les adobes doivent être liés par un mortier. Pour mieux s'adapter aux briques et aussi pour ne pas changer le caractère écologique de cette technologie, nous fabriquons le mortier avec la même terre dont nous fabriquons les briques.

L'utilisation des ajouts minéraux (poudre de verre, pouzzolane, laitier) dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des ajouts minéraux, notamment la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et le laitier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers de terre crue.

Pour atteindre notre but, nous avons divisé notre étude en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la revue bibliographique qui a permis de mettre en évidence l'intérêt de recherches sur:

La recherche sur la classification des argiles, les familles d'argile, les procédés de la stabilisation, La recherche sur les ajouts minéraux et effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité, La recherche sur Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux qui comprenait l'Hydratation et ionisation, Echange cationique, Flocculation et agglomération, Réaction pouzzolaniques, Carbonatation,

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit : sol local de Biskra, chaux vive de Saida, sable concassé et poudre de verre ; laitier ; pouzzolane comme un ajout. Ensuite, nous avons procédé à l'élaboration des différentes formulations et finalement la phase des essais.

Le troisième chapitre rassemble l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Nous avons étudié l'effet de l'utilisation des ajouts minéraux, notamment la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et le laitier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers de terre crue.

D'après les résultats expérimentaux on peut tirer les points suivants :

- ✓ la teneur 2% des ajouts minéraux donne les meilleures résistances (traction et compression cette amélioration est de l'ordre de 7.3 %, 42.44 % et 26.93 % pour

l'ajout de pouzzolane, poudre de verre et laitier respectivement pour la résistance à la compression et de 9.05 %, 17.22 % et 13.33 % pour la résistance à la traction.

- ✓ Le dosage de 2% de poudre de verre donne la meilleure valeur de résistance mécanique et durabilité pour tous les ajouts.
- ✓ La plus faible valeur de l'absorption totale de l'ajout est enregistrée pour le cas de 2% de poudre de verre (de l'ordre de 21%).
- ✓ Les meilleures valeurs des résistances et durabilité du mortier sont obtenues par l'ajout de poudre de verre suivis de laitier puis de pouzzolane.

## Références bibliographiques

### [A]

**Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985.

**Armel Babatoundé LAIBI** . Comportement hygro-thermo mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi BENIN ,2017.

**Azzouz F.Z.** Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magister Université de Tlemcen 179p. 2006.

**Ashurst, J., Ashurst, N.** Practical building conservation: brick, terracotta & earth. In: English Heritage Technical Handbook, vol. 2. Gower technical press, Hampshire, England. 1995.

### [B]

**Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** Performance of compacted cement stabilized soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.

**Behim M.** Sous produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux a matrice cimentaire. Thèse de doctorat, Université de Annaba, 173 p, 2005.

**Bokor Youssouf Sakine.** Vérification des caractéristiques des BTC Stabilises avec la chaux, Mémoire de Master, Institut International En Ingénierie de l'eau et de l'environnement , 2011.

**Bultel F.** Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse de Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées (France), (2001).

### [C]

**Cabane N.** Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004.

**Caillère S, Hénin S, Rautureau M.** Minéralogie des argiles Tome 01. Dunod, editor.Masson, p. 184, 1982.

[D]

**Diamond S, Kinter EB.** Mechanism of soil-lime stabilization. An interpretative review, Presentation at the 44th Annual Meeting, Highway Research Board. Washington, 1965.

[E]

**Eslinger and Peaver.** Clay minerals for petroleum geologists and engineers, SEPM Short course 22. Tulsa - USA, 1988.

[F]

**Florian champire .** Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction . THESE de DOCTORAT , L'UNIVERSITE DE LYON,2017.

[G]

**Givanildo anves de azeredo .** MISE AU POINT DE PROCEDURES D'ESSAIS MECANIKES SUR MORTIERS DE TERRE : APPLICATION A L'ETUDE DE LEUR RHEOLOGIE. Thèse de doctorates, Université Fédérale de Paraíba – Brésil, 2005).

**Guelberth, C.R., Chiras, D.** The Natural Plaster Book: Earth, Lime and Gypsum Renders for Natural Homes. New Society Publishers, Gabriola Island, Canada., 2003.

**Guettala A.** Béton de terre stabilise: amélioration de sa durabilité a l'eau. Thèse de doctorates, Université de Biskra, 203 p ,2003).

**Guillaud, H., & Houben, H.** Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses , 1995 .

[H]

**Haras nationaux.** Fiche techniques génie hippique. Mai 2019, 2004.

**Houben H, Guillaud H.** Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.

**Houben H, Guillaud H.** Traite de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.

[I]

**Izemouren.** Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2016.

[J]

**Jarrige JF.** Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgrah, Pakistan. pp. 21-28 in South Asian Archaeology, ed. B. Alichin, Cambridge University Press, 1989.

**Jimenez Delgado, M.C., Guerrero, I.C., 2006.** Earth building in Spain. Constr. Build. Mater. 20 (9), 679e690.

**Jouennec, A.** Traite de céramique et matériaux minéraux. Septima, 1990.

[K]

**Kézdi A .** Stabilized Earth Roads, Developments in geotechnical engineering 19. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY. 327 p, 1979.

**Khattab, S.** Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux, PhD. Orléans. France, 249 p, 2002.

**Konan, L.** Interaction entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse de Doctorat Unique, Université de Limoges (France), 2006.

[L]

**Lambe TW.** The Structure of Inorganic Soil, Proceeding. ASCE, Vol. 79, Separate No.315, 49p, 1953.

[M]

**McHenry, P.** Adobe and Rammed Earth Buildings: Design and Construction. The University of Arizona Press. Wiley-Interscience, Arizona, 1984.

**Minke, G.** Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser - Publishers for Architecture. , 2006.

**Morel. R.** Les sols cultivés. In Tec Doc Lavoisier, 389 p., Paris, 1996.

[P]

**Poppe, L.J., Paskevich, V.F., Hathaway, J.C., Blackwood, D.S .** A laboratory manual for X-ray powder diffraction. U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-041, 2001.

[R]

**Ramezani pour A. K.,** « Engineering properties and morphology of pouzzolanic cementconcrete », PhD Thesis, University of Leeds, 310 pages-April 1987.

[S]

**Sazs 724.** Standards Association Zimbabwe. Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures. Standards Association of Zimbabwe, Harare, 2001.

[T]

**Taallah.** Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2014.

[U]

**Unikowski. Z.R.** L'influence des argiles sur les mortiers de ciment. In Bull.Liaison Labo. Ponts et Chaussées, Rapport de recherche, number 110, Paris, 1982.

[V]

**Venkatrama Reddy BV, Gupta A.** Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils. Journal of Materials and Structures, 38, 651-658, 2005.

[W]

**Walker, P. Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V.** Rammed Earth: Design and construction Guidelines, first ed. BRE Bookshop, Watford, UK.,2005.

**Walker, P.** Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.

**Warren, J.** Conservation of Earth Structures, first ed. Butterworth Heinemann, British Library, Oxford, UK. , 1999.

**Wetshondo, O. D** Caracterisation et valorisation des materiaux argileux de la province de Kinshasa (RD Congo), These de Doctorat Unique de l'Universite de Liege (Belgique), 2012.

## La liste des normes

**NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par la méthode sédimentation.

**NF P 94-054** : Sols : Reconnaissance et essai détermination de la masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre.

**NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et essai détermination des limite d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau).

**NF P 18-560** : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par tamisage à sec.

**NF P 18 598** : Essai d'équivalent de sable.

**NF P 18 555** : Essai de la masse volumique apparent et absolue.

**AN F P18 – 592** : Essai au bleu de méthylène

**NFP 18-304** : Module de finesse

**XP-P 13 901** : Essais de la compression simple.

**NF EN 12390-5** : Essai de traction par flexion

**XP-P 13 901** : Essais d'absorption.

**XP-P 13 901** : Essais de gonflement.

**XP-P 13 901** : Essais d'abrasion.