

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 d'Hydraulique  
Référence : ...../2019



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2019

## Mémoire de Master

Filière : Génie Civile

Spécialité : Structure

Thème

# Effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des briques de terre crue

Nom et Prénom de l'étudiant :

- Zerrouki Ishak

Encadreur :

- Dr. Izemmouren Ouarda

Promotion Juillet 2019

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 d'Hydraulique  
Référence : ...../2019



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2019

## Mémoire de Master

Filière : Génie Civile

Spécialité : Structure

Thème

# Effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des briques de terre crue

Nom et Prénom de l'étudiant :

- Zerrouki Ishak

Encadreur :

- Dr. Izemmouren Ouarda

Promotion Juillet 2019

# DEDICACE

*En témoignage de gratitude et de fidélité.*

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents,*

*A mes frères « Abdelmadjid, Bouthaina, Aya et Mouaïth Zerrouki »,*

*A membres de laboratoire « Guimer M<sup>ed</sup> Salah et Bellebeir Oumeïma »,*

*A mes enseignants,*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis proches et loin*

*Toute et à tous ce que j'aime*

*Jadi...*

# REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mon père et mon mère et tous 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, et évidemment son expérience de la recherche scientifique qu'elle a.

J'exprime ma profonde gratitude au **Pr. Bouaziz Ahmed** et **Dr. Taallah Bachir**, pour leur encouragement et leur aide dans l'accomplissement de cette mémoire.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait d'être participer et bien vouloir juger le travail :

**Dr. Izemmouren Ouarda**

**Pr. Bouaziz Ahmed**

**Dr. Taallah Bachir**

**Pr. Mellas Mekki**

**Dr. Kadri karima**

Un remerciement particulier à mon ami proche **Abdallah Merzougui** pour sa fidélité et son soutien qui me donne le courage pour finaliser cette étude.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire qui sont **Guimer M<sup>ed</sup> Salah** et **Oumeima Belebsir** pour leur aide et leurs conseils pendant la durée de mes travaux.

Enfin un remerciement particulier et personnel à l'ensemble de ma famille et à tous mes amis et collègues de l'étude qui ont grandement contribué à faire de mon passage au mastère une belle expérience.

## المخلص

لكيلا ننسى المواد المحلية التي تساعد في تقليل استهلاك الطاقة وتكاليف البناء، تم استخدام نفايات الطوب الأحمر لتثبيت الطوب الطيني.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير استخدام فضلات الطوب الأحمر على القوة الميكانيكية للطوب الطيني. ركزت الدراسة أيضًا على اختبار المتانة، من خلال الامتصاص الكلي والشعيري، الانتفاخ واختبار الكشط. إن استخدام الرمال المكسرة في هذه الدراسة هو فقط للمقارنة. في هذا السياق، تم استخدام الجير الحي بنسبة (12%)، وثلاثة جرعات من نفايات الطوب الأحمر والرمل ذات مصدر الحجارة المكسرة (10 و 20 و 30 %) مقارنة بوزن التربة وهي جافة. تشير النتائج إلى وجود تحسن كبير في القوة الميكانيكية (الضغط والشد الجافين) وتجربة الكشط للطوب الذي يحتوي على إضافات تقدر بـ 30% من فضلات الطوب الأحمر والرمل المكسرة. تظهر النتائج أيضًا انخفاضًا عامًا في تجارب إمتصاص الماء الكلي والشعيري والانتفاخ للطوب "Adobe" مع زيادة محتوى فضلات الطوب الأحمر والرمل المكسرة.

الطوب المستقر بفضلات الطوب الأحمر (الطوب المطبوخ) توفر قوة ميكانيكية وديمومة أكبر مقارنة بالطوب المستقر بالرمل المكسر.

**الكلمات المفتاحية:** طوب الطين، فضلات الطوب الأحمر، الرمال المكسرة، المقاومة الميكانيكية، الديمومة

## RESUME

Afin de n'oublier pas les matériaux locaux, qui contribuent à réduire la consommation d'énergie et les coûts de construction, des déchets de brique rouge ont été utilisées pour stabiliser les briques de terre crue (l'adobe).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des déchets de brique rouge sur les résistances mécanique de la brique d'Adobe. L'étude s'est focalisée aussi sur les essais de la durabilité, à travers son absorption totale et capillaire, gonflement et abrasion. L'utilisation de sable concassé dans cette étude est seulement à titre de comparaison. Dans ce cadre, on a utilisé un teneur en chaux vive (12 %), trois teneurs de déchet de brique rouge et sable concassé (10, 20, et 30 %) du poids du sol sec. Les résultats indiquent qu'il y a une amélioration significative aux résistances mécanique (compression sèche et traction sèche) et l'abrasion des briques d'adobe avec l'ajout de 30% de déchet de brique rouge et sable concassé. Les résultats montrent aussi une baisse générale de l'absorption totale et capillaire d'eau et du gonflement des briques d'Adobe avec l'augmentation de la teneur en déchet de brique rouge et sable concassé.

Les briques stabilisées par le déchet de brique rouge (brique cuite) donnent des résistances mécaniques et durabilité considérablement plus fortes par rapport aux briques stabilisées au sable concassé.

**Mots Clés :** brique d'Adobe, déchet de brique rouge, sable concassé, résistances mécaniques, durabilité

# TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
الملخص.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Liste des abréviations.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	01
<b>CHAPITRE 01 : CONSTRUCTION EN TERRE</b>	
1.1. INTRODUCTION .....	03
1.2. LES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE.....	03
1.2.1. Le torchis .....	03
1.2.2. Le pisé .....	04
1.2.3. La bauge.....	05
1.2.4. Blocs de Terre comprimé .....	05
1.3. L'ADOBE.....	06
1.3.1. Introduction.....	06
1.3.2. Fabrication des briques d'adobe.....	07
1.3.2.1. A Babylone .....	07
1.3.2.2. En Égypte.....	07
1.3.3. Le choix de la terre .....	07
1.4. LES PROPRIETES DE LA TERRE COMME UN MATERIAU DE CONSTRUCTION....	08
1.4.1. Plasticité.....	09
1.4.2. Texture.....	10
1.4.3. Sulfates .....	11
1.4.4. Matière organique .....	11
1.5. LES ARGILES .....	12

1.5.1.	Structure de minéraux argileux.....	12
1.5.2.	Classification et types d'argiles .....	13
1.6.	STABILISATION.....	17
1.6.1.	Définition.....	17
1.6.2.	Objectifs.....	18
1.6.3.	Procédés. ....	18
1.6.3.1.	Stabilisation Mécanique.....	18
1.6.3.2.	Stabilisation Physique.....	18
1.6.3.3.	Stabilisation chimique.....	19
1.6.4.	Stabilisation des sols à la chaux .....	20
1.6.4.1.	Mécanismes de réactions sol – chaux.....	21
1.6.4.2.	L'effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	24
1.7.	LE DECHET DE BRIQUE.....	26
1.7.1.	Introduction.....	26
1.7.2.	Définition de brique.....	27
1.7.3.	Technique de la production de la brique.....	27
1.7.4.	Les caractéristiques physico-chimiques de la brique .....	27
1.7.5.	Le déchet de brique rouge Dans le béton.....	28
1.8.	CONCLUSION.....	30
 <b>CHAPITRE 02 : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES</b>		
2.1.	INTRODUCTION .....	31
2.2.	SOL .....	31
2.2.1.	Caractéristiques physiques du sol .....	32
2.2.1.1.	Densité des grains .....	32
a.	Masse volumique absolue .....	32
b.	Masse volumique apparente .....	32
2.2.1.2.	Limites d'Atterberg .....	33
2.2.1.3.	Composition granulaire .....	34
2.2.2.	Analyse physico –chimique .....	36
2.2.2.1.	Mesure du pH .....	36
2.2.2.2.	Essai au bleu de méthylène .....	37

2.3. CHAUX .....	38
2.4. SABLE CONCASSE .....	39
2.5. DECHET DE BRIQUE ROUGE .....	40
2.5.1. Caractéristiques physiques de déchet de la brique rouge.....	41
2.5.2. Influence du Pourcentage de déchet sur les Limites d’Atterberg .....	41
2.6. CONDUITE DE L’ESSAI.....	42
2.6.1. Matériel spécifique.....	42
2.6.2. Confection des éprouvettes .....	43
2.6.3. Optimisation de la chaux.....	43
2.6.4. Vérification de la teneur en eau.....	43
2.6.5. Mélanges .....	44
2.6.6. Préparation des mélanges .....	45
2.6.7. Mode de conservation .....	45
2.7. RESISTANCES MECANIQUES.....	46
2.7.1. Essai de compression simple.....	46
2.7.2. Essai de traction par flexion .....	47
2.8. LA DURABILITE.....	48
2.8.1. Gonflement.....	48
2.8.2. L'absorption capillaire .....	49
2.8.3. L'absorption totale.....	50
2.8.4. Résistance à l’abrasion.....	51
2.9. CONCLUSION .....	52
 <b>CHAPITRE 03 : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	
3.1. INTRODUCTION .....	53
3.2. EFFET DU DOSAGE DE SABLE CONCASSE ET DE DECHET DE BRIQUE ROUGE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES.....	54
3.2.1. Résistance à la compression.....	54
3.2.2. Résistance à la traction.....	56
3.3. EFFET DU DOSAGE DE SABLE CONCASSE ET DE DECHET DE BRIQUE ROUGE SUR LA DURABILITE.....	57
3.3.1. Absorption d’eau .....	57

<b>3.3.1.1.</b> Absorption totale.....	57
<b>3.3.1.2.</b> Absorption capillaire.....	59
<b>3.3.2.</b> Gonflement par immersion .....	60
<b>3.3.3.</b> Résistance à l'abrasion.....	61
<b>3.4.</b> CONCLUSION.....	62
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	64
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	66

## LISTE DES FIGURE

<b>Figure 1.1 :</b>	Mur en torchis en cours de réalisation qui laisse voir les tiges de bois obliques Entre les poteaux de l'ossature bois principale. (Permaculture Design, 2018).....	04
<b>Figure 1.2 :</b>	La technique de réalisation du pisé. (Houben et al, 1979).....	04
<b>Figure 1.3 :</b>	Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge. (Permaculture Design, 2018).....	05
<b>Figure 1.4 :</b>	Exemples de brique de terre compressée de différentes tailles. (Permaculture Design, 2018).....	06
<b>Figure 1.5 :</b>	Petites briques d'Adobe retournées après 2 jours de séchage. (Permaculture Design, 2018).....	06
<b>Figure 1.6 :</b>	Limites d'Atterberg. (Bund et al, 2016).....	09
<b>Figure 1.7 :</b>	Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre (Jiménez Delgado MC et al., 2007).....	10
<b>Figure 1.8 :</b>	Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre. (Jiménez Delgado MC et al., 2007).....	11
<b>Figure 1.9 :</b>	Structure du tétraèdre SiO <sub>4</sub> . (Cabane, 2004).....	13
<b>Figure 1.10 :</b>	Structure de l'octaèdre Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> . (Cabane, 2004).....	13
<b>Figure 1.11 :</b>	Structure de la kaolinite. (Grimm, 1962) cité par Bibi et Al., (2016).....	14
<b>Figure 1.12 :</b>	Les feuilles de kaolinite et les deux couches de (T) et (O) (Hubert et Guillaud, 2006).....	14
<b>Figure 1.13 :</b>	Structure de l'illite. (Grimm, 1962) cité par Bibi et Al., (2016).....	15
<b>Figure 1.14 :</b>	Les feuilles de l'illite et les ions de potasse (K <sup>+</sup> ). Hubert et Guillaud, (2006).....	15
<b>Figure 1.15 :</b>	Forme structurale d'une structure T-O-T. (Poppe et al, 2001).....	16
<b>Figure 1.16 :</b>	Les feuilles de la montmorillonite de structure de type 2.1. Hubert et Guillaud, (2006).....	16

<b>Figure 1.17 :</b>	Structure des argiles. (Dessin de droite : Laboratoire Léon Brillouin ; Bund et al, 2016).....	16
<b>Figure 1.18:</b>	Types de gonflements, (Benaïssa Mohamed, 2011).....	17
<b>Figure 1.19 :</b>	Choix de la Méthode de stabilisation d'Après (Curin et al. 1976 ; Bensalem Ahmed, 2010).....	20
<b>Figure 1.20 :</b>	Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de chaux. (M.AFES, G.DIDLER, 2000).....	22
<b>Figure 1.21 :</b>	Effets de la teneur en Chaux sur la résistance à la compression en fonction de l'âge. (Little, 1995).....	25
<b>Figure 1.22 :</b>	La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge (Ausroads,1998).....	25
<b>Figure 1.23 :</b>	Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux (Millogo ,2008).....	26
<b>Figure 2.1 :</b>	Situation Géographique du Gisement de (SOL-BISKRA).....	31
<b>Figure 2.2:</b>	Appareillage de mesure de la masse volumique apparente.....	33
<b>Figure 2.3:</b>	Appareillage de mesure de la masse volumique absolue.....	33
<b>Figure 2.4 :</b>	La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe (Jiménez Delgado MC et al., 2007 ; Izemmouren, 2016).....	34
<b>Figure 2.5 :</b>	Analyse granulométrique de sol après et avant l'ajout de 30% de sable concassé.....	35
<b>Figure 2.6 :</b>	Diagramme de plasticité (la norme NF P 94-051).....	36
<b>Figure 2.7 :</b>	Le pH du sol.....	37
<b>Figure 2.8 :</b>	Auréoles bleues sur papier filtre (taches).....	38
<b>Figure 2.9 :</b>	Analyse granulométrique du sable concassé.....	40
<b>Figure 2.10 :</b>	Broyage de la brique rouge.....	40
<b>Figure 2.11 :</b>	La composition granulaire du déchet.....	41
<b>Figure 2.12 :</b>	Le moule utilisé pour le moulage et la confection des briques.....	42
<b>Figure. 2.13 :</b>	Optimisation de la teneur en chaux.....	43
<b>Figure 2.14 :</b>	Contrôle de la teneur en eau (CRA terre, 1979).....	44
<b>Figure 2.15 :</b>	Malaxeur de marque SIGMA .....	45
<b>Figure 2.16 :</b>	Conservation des blocs au laboratoire.....	46

<b>Figure 2.17 :</b>	Essai d'écrasement de l'éprouvette.....	47
<b>Figure 2.18 :</b>	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (NF EN 12390-5).....	48
<b>Figure 2.19 :</b>	L'essai de résistance à la flexion.....	48
<b>Figure 2.20 :</b>	Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901).....	49
<b>Figure 2.21 :</b>	L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901).....	49
<b>Figure 2.22 :</b>	Essai d'absorption capillaire d'eau.....	50
<b>Figure 2.23 :</b>	Immersion totale des blocs.....	51
<b>Figure 2.24 :</b>	Essai de résistance à l'abrasion.....	52
<b>Figure 3.1 :</b>	Influence du dosage de SC et le DBR sur la résistance à la compression (12% de chaux).....	55
<b>Figure 3.2 :</b>	Influence du dosage de SC et le DBR sur la résistance à la traction (12% chaux).....	56
<b>Figure 3.3 :</b>	Influence du dosage en DBR et SC sur l'absorption totale.....	58
<b>Figure 3.4 :</b>	Influence du dosage en DBR et SC sur l'absorption capillaire.....	59
<b>Figure 3.5 :</b>	Influence du dosage en DBR et SC sur le gonflement.....	60
<b>Figure 3.5 :</b>	Influence du dosage en DBR et SC sur l'essai de l'abrasion.....	61
<b>Figure 3.7 :</b>	Montre l'effet de l'ajout de 30% en déchet de brique sur la résistance à l'abrasion.....	62

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1 :</b>	Composition minéralogique de déchets de briques. (Aissa Salem, 2016)...	28
<b>Tableau 2.1 :</b>	Masses Volumiques du sol.....	32
<b>Tableau 2.2 :</b>	Limites d'Atterberg de sol.....	33
<b>Tableau 2.3 :</b>	Valeur du bleu de méthylène.....	38
<b>Tableau 2.4 :</b>	Les caractéristiques physiques et la composition chimique de la chaux vive (Saida ; Izemmouren, 2016).....	39
<b>Tableau 2.5 :</b>	Masses Volumiques du sable concassé et distribution de la taille des.....	39
<b>Tableau 2.6 :</b>	Masses Volumiques du déchet de la brique rouge.....	41
<b>Tableau 2.7 :</b>	Limites d'Atterberg de mélange de (Sol + Déchet de brique rouge).....	42
<b>Tableau 2.8 :</b>	Composition des mélanges.....	44
<b>Tableau 3.1 :</b>	Les valeurs de la résistance à la compression pour les BAS et les BAD.....	55
<b>Tableau 3.2 :</b>	Les valeurs de la résistance à la traction pour les BAS et les BAD.....	56

## LISTE DES ABRIVIATIONS

<b>AFNOR</b>	: Association française de normalisation.
<b>ATE</b>	: l'Absorption Totale d'Eau.
<b>BA</b>	: Brique d'Adobe.
<b>BAD</b>	: Brique d'Adobe à base de Déchet de brique rouge.
<b>BAS</b>	: Brique d'Adobe à base de Sable concassé.
<b>BAS</b>	: Brique d'Adobe Stabilisé.
<b>BOR</b>	: la brique de référence (Ordinaire ou témoins).
<b>BTC</b>	: Brique de Terre Comprimée.
<b>CEC</b>	: Capacité d'Echange Cationique.
<b>DBR</b>	: Déchet de Brique Rouge.
<b>RCBDB</b>	: Résistance à la Compression pour les Briques à base de Déchet de Brique rouge.
<b>RCBSC</b>	: Résistance à la Compression pour les Briques à base de Sable Concassé.
<b>RCS</b>	: Résistance à la Compression Sèche.
<b>RTBDB</b>	: Résistance à la traction pour les briques à base de Déchet de Brique rouge.
<b>RTBSC</b>	: Résistance à la Traction pour les briques à base de Sable concassé.
<b>RTS</b>	: Résistance à la Traction Sèche.
<b>SC</b>	: Sable Concassé.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les premières civilisations dans nombreux endroits à travers la planète, l'homme a utilisé les techniques de construction à base de la terre crue. Elle est significative dans la construction car sa disponibilité et sa proximité de la réalisation de l'habitat. Parmi le côté positif de la construction en terre crue, elle permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. La terre, comme un matériau de construction, est utilisée dans le domaine de construction depuis des millénaires puisqu'elle est disponible en grande quantité.

La construction en terre crue est une technique soumise à des perfectionnements. Elle permet de construire des monuments ou des édifices simples dans des environnements différents. Le développement des nouveaux matériaux (béton, mortier, acier...) et les techniques de construction aide l'homme à oublier les avantages de la terre dans la construction.

Le recyclage des déchets a devenu aujourd'hui la bonne solution qui peut offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui contribuent dans le processus de la construction dans le domaine de constructions et ainsi pour protéger l'environnement. Les déchets de briques rouges constituent une alternative intéressante dans ce cas vu que ces déchets sont disponibles et sont abandonnés au niveau des chantiers. Pour atteindre ces objectifs on essaie à travers ce travail d'ordre expérimental de les utiliser comme constituant dans la stabilisation des briques de terre crue.

La technique des briques d'Adobe est une technique ancienne qui permet de construire des maisons simples. Aujourd'hui grâce aux différents modes de stabilisation, les techniques de construction en terre crue développent. Dans cette recherche, l'incorporation des déchets de briques rouges s'effectue par la substitution de la terre crue par différents teneurs pour étudier l'effet de ce déchet sur la stabilisation des briques d'Adobe. Donc est-ce que le déchet de brique rouge comme un ajout inerte permet d'augmenter la stabilisation de brique de terre crue ou non ?

L'objectif général de cette recherche est d'obtenir une stabilisation importante des briques d'Adobe à travers le déchet de brique rouge. Les objectifs consistent à :

- Étudier l'effet de déchet de brique rouge sur sa résistance mécanique de brique d'Adobe.
- Étudier l'effet des déchets de brique rouge sur l'insensibilité à l'eau de brique d'Adobe.

À travers ces objectifs et pour étudier l'effet de déchet de brique rouge. 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, en particulier l'adobe ainsi que les techniques de mise en œuvre. Il exposera les propriétés de la terre comme un matériau de construction et un rappel sur les argiles. Ce chapitre présentera aussi l'effet de la chaux sur la stabilisation de briques d'adobe et les propriétés de déchet de brique rouge.

Le deuxième chapitre est destiné pour identifier les caractéristiques des matériaux utilisés (sol, chaux, sable concassé, et le déchet de brique rouge). 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 les effets de déchet de brique rouge et de sable concassé sur les résistances mécaniques et la durabilité.

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

**Chapitre 01 :**

**Construction En Terre**

## **1.1. INTRODUCTION**

La terre, matériau disponible en quantité et omniprésent, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. Qu'elle soit en pisé, en torchis, en adobe ou encore en briques de terre comprimée, l'architecture de terre permet de construire des édifices simples ou monumentaux dans des environnements variés. Depuis toujours, cette technique de construction est soumise à des perfectionnements. La terre crue est une matière principale dans la construction en Adobe. Elle est disponible et agréée comme matériau de construction alors ses caractéristiques significatives ont permis de l'utiliser dans plusieurs domaines de construction. Aujourd'hui la construction en terre a été témoinnée par la solidité et la durabilité.

## **1.2. LES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE**

La technique de construction en terre crue est une technique très connue et utilisée par les êtres humains dans tout le monde. Il existe nombreux et différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Houben et Guillaud, (1994) dénombre douze techniques. Chaque technique demande une terre précise parce que chaque technique a une formulation différente. Les cinq techniques de construction sont : Torchis, le pisé, la bauge, les blocs de terre comprimée et l'adobe. (Houben et Guillaud, 1994 ; Izemmouren, 2016)

### **1.2.1. Le torchis**

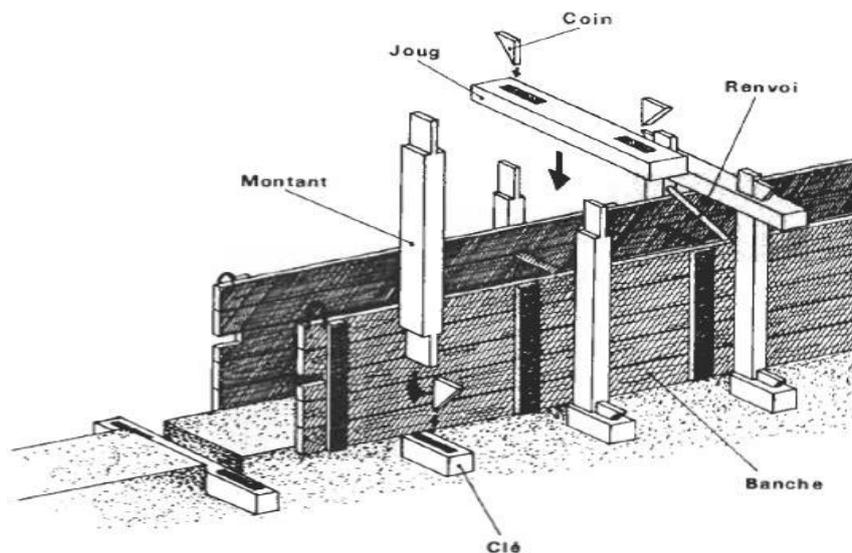
Le torchis se fixe sur une ossature bois. C'est un mélange de terre et de paille. Comme les tiges sont longues, le mélange est difficile à brasser. On le prépare donc en superposant différentes couches de terre puis de paille (imprégnée d'eau), en terminant par l'eau. On le brasse ensuite soit à la fourche, soit en le piétinant, soit en le faisant piétiner par des animaux. (Permaculture Design, 2018)



**Figure 1.1** : Mur en torchis en cours de réalisation qui laisse voir les tiges de bois obliques Entre les poteaux de l'ossature bois principale. (Permaculture Design, 2018)

### 1.2.2. Le pisé

Ce procédé utilise un matériau sableux ou graveleux (diamètre maximal des grains varie de 10 à 60 mm), préparé à l'état peu humide (teneur en eau de l'ordre de 10 à 15%). La méthode artisanale traditionnelle de mise en œuvre consiste à compacter manuellement la terre entre deux banches de bois (coffrages de 60 cm de hauteur, 40 à 60 cm de largeur, et 3 à 5 m de longueur), à l'aide de dames ou pisoirs. La mise en œuvre du pisé s'est modernisée en utilisant des dames adaptées sur un marteau piqueur et des branches modulables métalliques. (Myriam Olivier et Ali Mesbah, 2016)



**Figure 1.2** : la technique de réalisation du pisé. (Houben et al, 1979)

### 1.2.3. La bauge

La technique de la bauge se retrouve traditionnellement en Normandie. Cette technique consiste à édifier des murs massifs avec un mélange de terre, d'eau et des fibres végétales voire animales par empilement de motte à l'état plastique ou le moule ou coffrage ne sont pas nécessaire.

Selon (Permaculture Design, 2018), le taux d'argile dans la terre doit être de 20 à 30 % au moins. À plus de 50 ou 60 % d'argile, la terre se casse au séchage. La terre doit être boueuse lorsqu'on l'utilise. On la jette au niveau du mur et on ne tasse pas (impossible, car elle est boueuse). On monte le mur sur environ 80 cm, puis on le recouvre d'une couche de branches. On laisse sécher et on recommence jusqu'à arriver en haut. La bauge peut être fibrée en y ajoutant de la paille.



**Figure 1.3 :** Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge. (Permaculture Design, 2018)

### 1.2.4. Blocs de terre comprimée

(Rigassi, 1995 ; Izemmouren, 2016) déclarent que le BTC est une technique utilisée pour compresser la terre séchée en utilisant une presse pour augmenter la résistance mécanique du bloc, et aussi leur résistance aux dommages qui peuvent être causés par l'eau. C'est une évolution technique du bloc moulé d'adobe. Ces blocs sont des petits éléments de maçonneries généralement de forme parallélépipédique.



**Figure 1.4:** Exemple de brique de terre compressée de différentes tailles.  
(PermacultureDesign, 2018)

## 1.3. L'ADOBE

### 1.3.1. Introduction

Le terme « ADOBE » vient de l'égyptien « THOBE » signifiant (brique). Il a donné naissance au mot (arabe) « ATTOB ». (Houben et al, 1979) déclarent que la technique de l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques de terre et à les laisser sécher au soleil. Il connaît aussi sous le nom « brique de terre crue ». Il existe de multiple forme d'adobe : coniques, cylindriques, trapézoïdales, ces formes particulières se situent entre le façonnage manuel de la terre sou forme de boules et l'apparition du moule rectangulaire.



**Figure 1.5 :** Petites briques d'Adobe retournées après 2 jours de séchage. (Permaculture Design, 2018)

### 1.3.2. Fabrication des briques d'adobe

Avant d'aborder des problèmes techniques de la fabrication de l'adobe, il est intéressant d'avoir l'historique de la fabrication de l'adobe. Il est connu que le travail de l'adobe était plus rapide et plus facile que celui de la pierre.

#### 1.3.2.1. A Babylone

On avait la matière première sous la main, on avait donc à pétrir la terre et à ajouter une certaine quantité d'eau. On foulait aux pieds ce mélange dans de larges bassins sans profondeur pour donner plus de consistance. On y ajoutait pour la brique de terre crue de la paille hachée en petits morceaux. L'argile pétrie était façonnée dans des moules à peu près carrés qui donnent des larges briques supérieures. Elles avaient 20 à 40 cm de côté sur 5 à 10 cm d'épaisseur. La plupart étaient simplement exposées au soleil. Elles étaient rapidement séchées surtout pendant les mois d'été (le mois de la brique) (Houben et al, 1979).

#### 1.3.2.2. En Égypte

La brique de terre crue était couramment employée en Égypte. Il a été mentionné (d'après les briques d'adobe déjà préparées) que le moule n'était alors guère différent de celui qu'on utilise aujourd'hui il existe une scène que représente des captifs moulant des briques pour construire le temple d'Amon. Voici les différentes étapes de la confection des briques d'adobe (Houben et al, 1979) :

- a. Il faut piocher et emporter la terre.
- b. Puiser de l'eau pour la détremper.
- c. Mouler les briques et les disposer en damier.
- d. Transporter à l'aide d'une sorte de joug après une première dessication.
- e. Placer les unes sur les autres en pile régulières et distante de façon à laisser l'air circuler dans les intervalles pour les sécher.

### 1.3.3. Le choix de la terre d'adobe

Il est plus aisé d'exploiter une carrière dans le sol. Le sable, limon et d'argile sont les plus aptes à la fabrication de l'adobe. Les proportions sont les suivantes : -sable 55 à 75% - limon 10 à 28 % -argile 15 à 18%, matière organique inférieurs à 3%. Plusieurs cas peuvent se présenter (Houbenet al, 1979) :

- a. Il y a trop d'argile : des fissures se produiront dans les briques lors de séchage. En effet son instabilité volumique en présence d'eau explique le phénomène.
- b. Il y a trop de sable : les grains trop nombreux ne pourront être tous suffisamment liés la cohésion sera trop faible et le brique se désagrègeront.
- c. Il y a trop de matière organique : l'effet de leur décomposition se traduit par une instabilité des caractères du matériau dans le temps, une porosité et une mauvaise durabilité en présence d'eau.

Il est important de savoir le type de terre approprié à la fabrication de l'adobe. On devra évaluer la capacité, la profondeur et l'homogénéité de la carrière choisie. L'extraction de la couche de terre végétale se fait manuellement à la pioche...etc. le volume de terre foisonnée est de 30% supérieur au volume des briques. Les tamis auront des mailles d'un diamètre de 6 à 12mm le tamisage se fait en générale dans la zone même de l'extraction. Un homme peut tamiser 4m<sup>3</sup>de terre par jour. Ex : une production journalière de 500 briques de 30×15×10cm demande 650 litres d'eau (Houben et al, 1979).

#### **1.4. LES PROPRIETES DE LA TERRE COMME UN MATERIAU DE CONSTRUCTION**

La terre est un matériau meuble de plusieurs épaisseurs qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée par processus très lents de dégradation et des mécanismes très complexes de migration de particule. Elle est riche en matière organique plus ou moins altérée. Lorsque la terre est meuble, elle est contenue peu de matière organique, les niveaux superficielles des sols sont utilisables pour la construction en terre.

(Myriam Olivier et Ali Mesbah, 2016) déclarent que le matériau terre rassemble différents constituants (eau, air, matières organiques et les matières solides) dont les proportions respectives caractérisent la structure et la texture de la terre. Il est formé d'un mélange d'agrégats aux éléments naturels, et proportions variables (graviers, sables, limons, argiles).

Ce matériau a des différentes caractéristiques qui le distinguent des autres matériaux, les propriétés sont les suivantes :

### 1.4.1. Plasticité

La plasticité est la capacité de maintenir une déformation des matériaux sans se rompre. Elle est une technique de cohérence des sols. La plasticité est similaire avec les briques d'Adobe et la bauge, en affectant l'utilisation de brique de terre crue demande un volume de liquide limité et un indice de plasticité important comparé aux techniques de construction plus sèche. En générale, le bon type de terre de construction demande un indice de plasticité compris entre 16 à 33% et une limite de liquidité entre 31 à 50%. (Jiménez Delgado et al,2007 ; Izemmouren, 2016).

La teneur et la nature des argiles des sols déterminent largement leurs caractéristiques géotechniques. Le test le plus simple pour déterminer la présence d'argile est le test au bleu de méthylène qui donne une indication sur la teneur en argile des sols et matériaux. Dans une autre approche, l'échantillon de sol est soumis au test d'Atterberg. Ce test permet de déterminer la sensibilité d'un échantillon de sol à l'eau sans passer par l'analyse minéralogique de sa partie fine.(Bund et al, 2016).

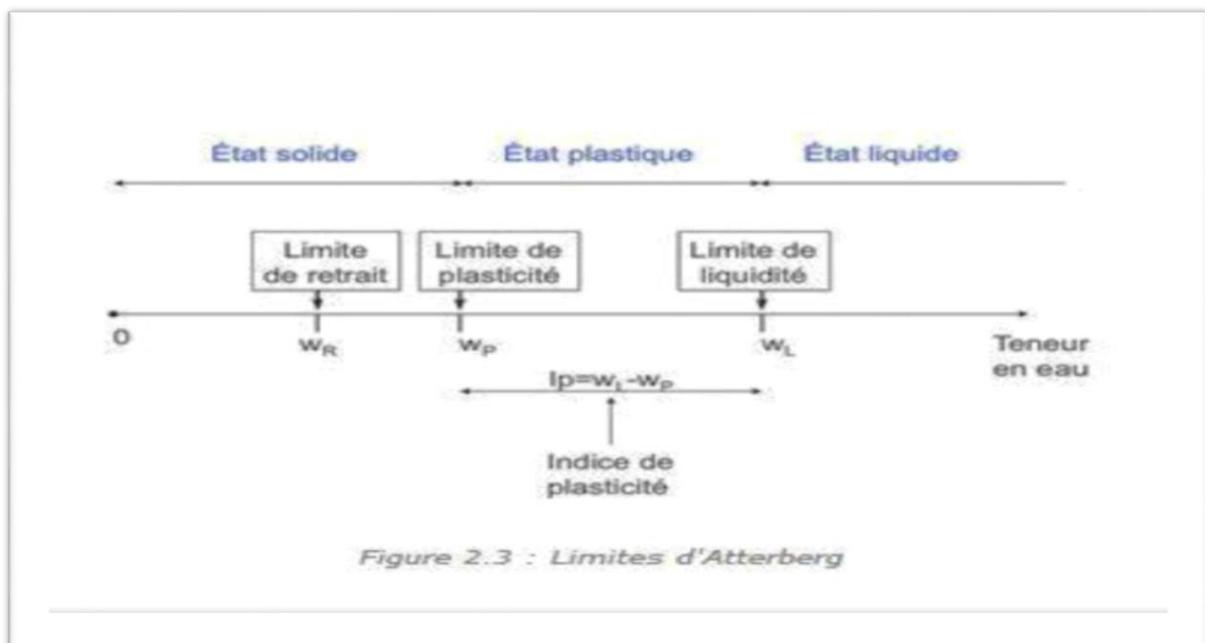
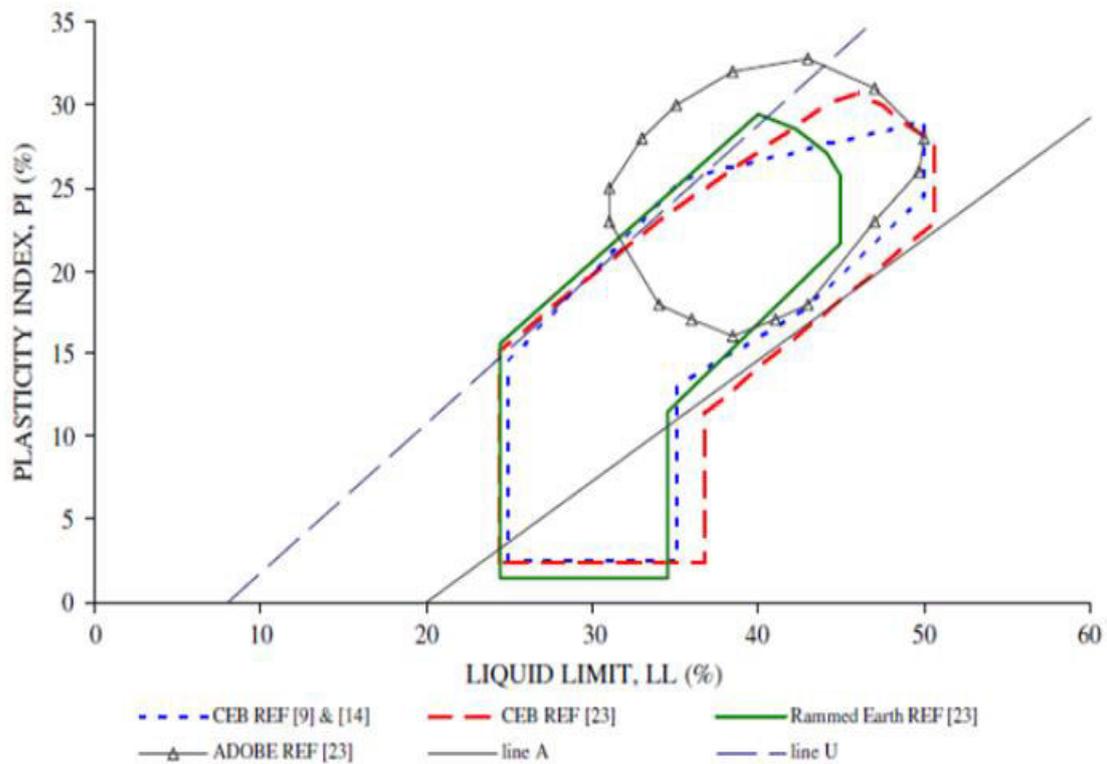


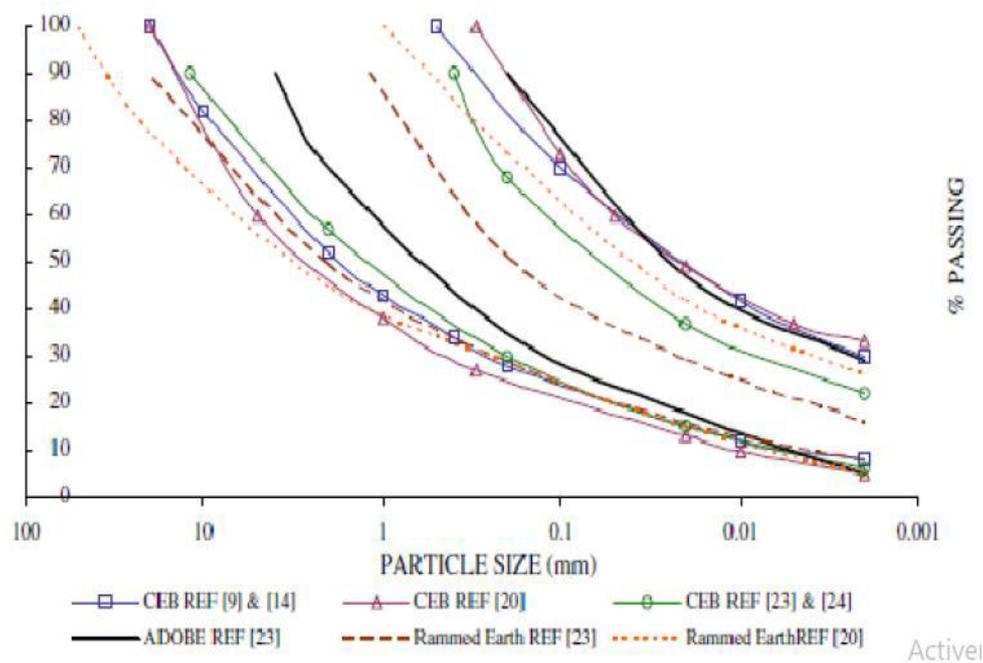
Figure 1.6 : limites d'Atterberg. (Bund et al, 2016).



**Figure 1.7:** Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre (Jiménez Delgado MC et al., 2007).

#### 1.4.2. Texture

Les techniques de construction en terre permettent de montrer des fuseaux granulaires en références. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile qu'il pourrait être établi à 5% pour toutes les techniques. (Jiménez Delgado et al., 2007) montrent que le pourcentage commun d'argile est entre 10% et 22% pour le BTC et entre 5% et 28% pour l'Adobe. (Guettala et al, 1997) montrent qu'il est important de fragmenter le sol cohésif.



**Figure 1.8** : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre. (Jiménez Delgado MC et al., 2007).

### 1.4.3. Sulfates

Des quantités variables de sulfate ont existés dans les sols. Ils peuvent entrainer dans certaines conditions la solubilité du sulfate et sa répartition dans le sol. Le sol contenant des minéraux, peut former des sulfates qui s'oxydent avec les minéraux de sulfure. Alors cette transformation permet une transformation du volume et des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau. (Houben et Guillaud ,2006) donnent des recommandations de faire plusieurs études pour les terres contenant plus de 2% à 3% de sulfates.

### 1.4.4. Matière organique

Les matières organiques se sont des débris végétaux et animaux dans les sols avec une couleur noirâtre. Elles sont concentrées dans l'horizon de surface des sols, sur une épaisseur de l'ordre de 5 à 35cm. La matière organique a une forte capacité du change basique et d'absorption de l'eau qui augmente son volume. La nature spongieuse de cette matière donne une faible résistance mécanique. Elle est aussi de nature acidulé, cette propriété provoque des réactions acidulées avec l'eau du sol qui peuvent avoir des effets corrosifs sur les matériaux

en contact. Le pourcentage de la teneur de matière organique affecte particulièrement sur les caractéristiques de la terre.

Selon (Houben et Guillaud, 2006), la matière organique est supérieure à 1% dans le sol cause un danger potentiel. L'effet de ces matières organiques est de retarder la réaction pouzzolanique puisqu'elles augmentent la surface d'argile et gênent la réaction ciment argile.

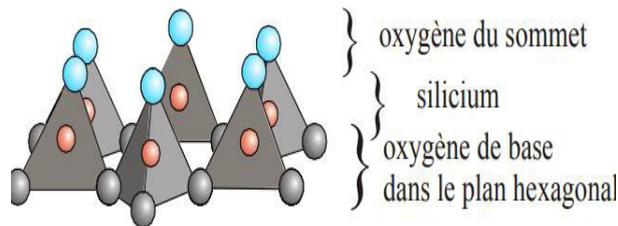
## 1.5. LES ARGILES

Ce sont des morceaux microscopiques de dimension inférieure à 0.002mm (2 $\mu$ m). Les particules d'argiles diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques.

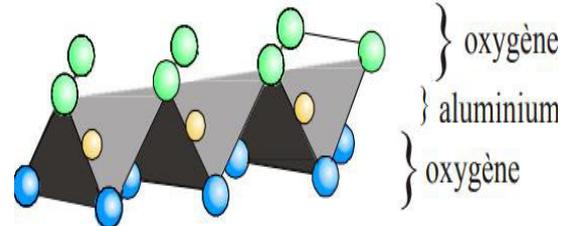
- Chimiquement, à l'état normale l'argile est composée de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, argonite, ...), la silice (cristobalite, tridymite), des oxydes et des hydroxydes d'aluminium (corindon, diaspore), ou encore des minéraux ferri-fères. (Taallah, 2014).
- Physiquement, les argiles sont des fins cristaux de forme irrégulière ou hexagonale, plate et allongée. Ils ont une surface spécifique qui est exactement plus grande que celle des particules grossières de forme anguleuse ou sphérique. (Houbenet Guillaud, 2006)

### 1.5.1. Structure de minéraux argileux

Ils sont généralement composés des phyllosilicates hydratés qui forment des feuillets infinis bi-dimensionnels. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un réseau de tétraèdres SiO<sub>4</sub> (Figure 1.8). Chaque tétraèdre SiO<sub>4</sub> 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 AlO<sub>6</sub>(Figure 1.9). 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)



**Figure 1.9 :** Structure du tétraèdre  $\text{SiO}_4$ . (Cabane, 2004)



**Figure 1.10 :** Structure de l'octaèdre  $\text{Al}_2\text{O}_6$ . (Cabane, 2004)

Les argiles, au contraire aux autres minéraux, présentent une cohésion qui résulte des interactions avec l'eau (Cobane, 2004). Alors, pour bien comprendre le comportement d'argile vis-à-vis de l'eau, il est nécessaire de connaître leur comportement monominéral, leur structure, et leur affinité à l'eau.

### 1.5.2. Classification et types d'argiles

Différentes classifications d'argiles ont été proposées. (Pedro, 1994) permet d'aboutir une classification qui prend en compte : le type de feuillet 2.1 ou 1.1, leur charge globale et la nature des cations interfoliaires. Donc la classification d'argiles la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, on distingue 4 groupes :

- Type de minéraux à  $7 \text{ \AA}$  : le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T.O ou type 1.1
- Type de minéraux à  $10 \text{ \AA}$  : le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T.O.T ou type 2.1. Les feuillets présentent un déficit en charges positives.
- Type de minéraux à  $14 \text{ \AA}$  : Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T.O.T.O et de couches octaédriques interfoliaires par deux couches tétraédriques. Il est qualifié de type 2.1.1
- Minéraux interstratifiés : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

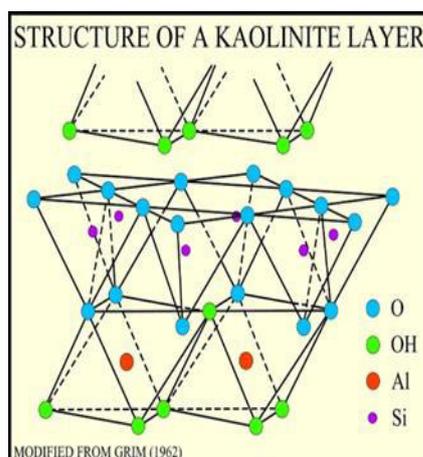
Selon (Houben et Guillaud, 2006), Il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ce sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente :

- a- Kaolinites.
- b- Illites.
- c- Montmorillonites.

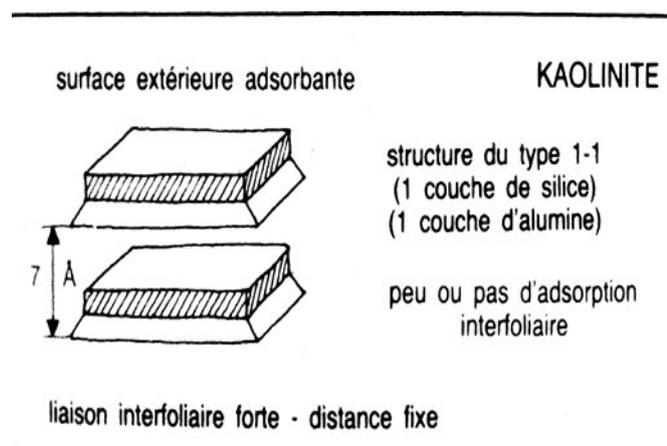
### A. La kaolinite :

C'est une structure de type 1.1 composée de deux couches de nature différent (T.O) ; une couche de tétraèdres d'oxygène à base de silicium et une couche d'octaèdres d'oxygène à base d'aluminium. La fusion de ces deux couches donne une couche appelée feuillet, elle présente des charges négatives dans ces bordures.

- La distance interfoliaire est fixe,  $7\text{\AA}$ .
- L'épaisseur des cristaux est de  $0.005$  à  $2\mu\text{m}$ .
- La surface externe SE est de  $10$  à  $30\text{m}^2/\text{g}$ .
- La surface interne SI=0.



**Figure 1.11:** Structure de la kaolinite. (Grim, 1962) cité par Bibi et Al., (2016)

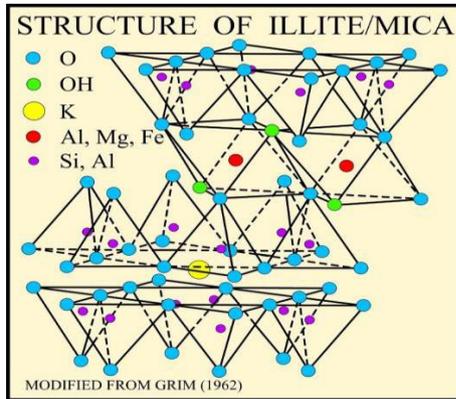


**Figure 1.12:** les feuilles de kaolinite et les deux couches de (T) et (O). (Houbenet Guillaud, 2006)

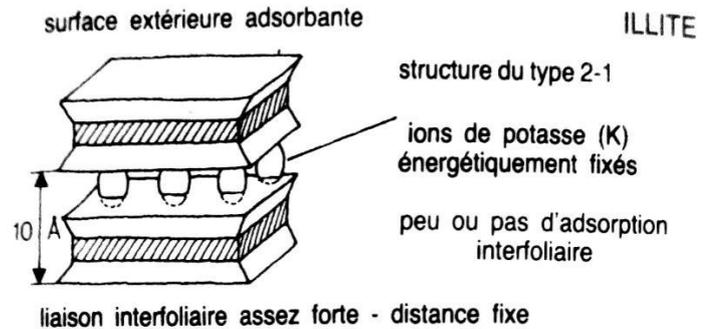
### B. Illites :

C'est une structure de type 2.1 composé de trois couches ; une couche octaédrique alumineuse entre deux couches tétraédriques principalement siliceuses. Il existe une charge élevée complètement négative équilibrées par des ions  $\text{K}^+$  avec des fortes liaisons.

- La distance interfoliaire est  $10\text{\AA}$ .
- L'épaisseur des cristaux est de  $0.005$  à  $0.05\mu\text{m}$ .
- La surface externe SE est de  $80\text{m}^2/\text{g}$ .
- La surface interne SI= $800\text{m}^2/\text{g}$ .



**Figure 1.13:** Structure de l'illite.  
(Grimm, 1962) cité par Bibi et Al., (2016)



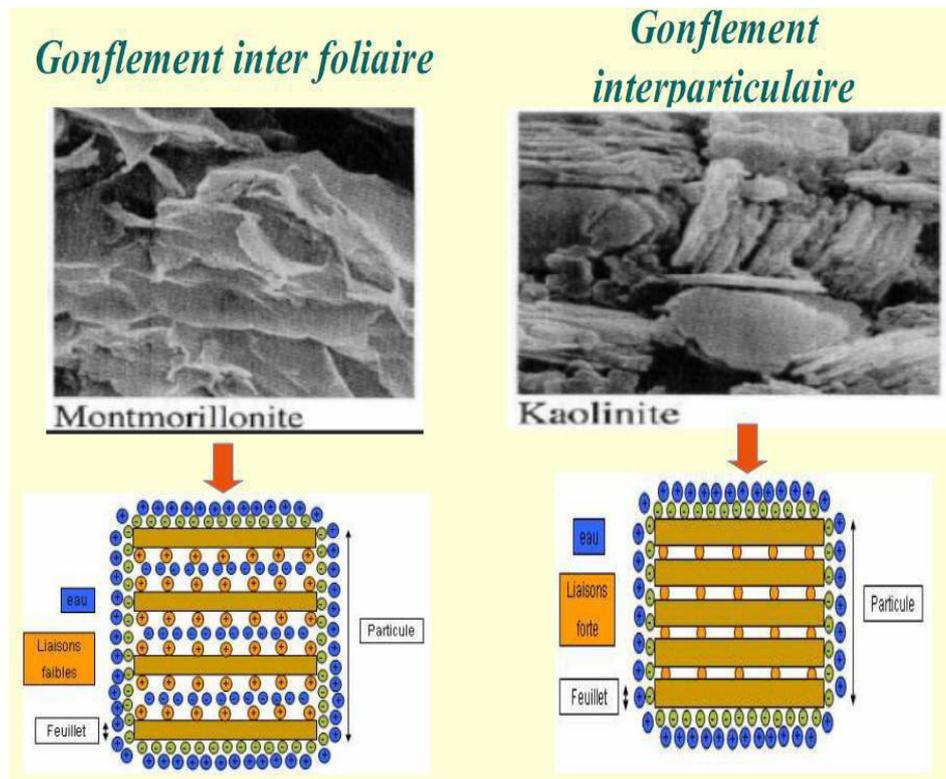
**Figure 1.14:** les feuilles de l'illite et les ions de potasse ( $\text{K}^+$ ). (Houbenet Guillaud, 2006)

### C. Montmorillonite :

C'est une structure similaire à celle de l'illite, mais les feuillets ne sont pas électriquement neutres et faiblement liés. Les ions interfoliaires sont remplacés par des cations échangeables (Na, Ca) et des molécules d'eau.

- La distance interfoliaire entre  $14$  à  $20\text{\AA}$ .
- L'épaisseur des cristaux est de  $0.001$  à  $0.02\mu\text{m}$ .
- La surface externe SE est de  $80\text{m}^2/\text{g}$ .
- La surface interne SI= $800\text{m}^2/\text{g}$ .





**Figure 1.18:** types de gonflements, (Benaissa Mohamed, 2011)

La figure ci-dessous montre la différence de gonflement entre les deux types qui sont la kaolinite et la montmorillonite. Le Roux (1996) déclare que la kaolinite donne la meilleure résistance par rapport à les deux types d'argiles précédent (illite et montmorillonite), malgré qu'une réaction moins active comparée à la montmorillonite.

## 1.6. STABILISATION

### 1.6.1. Définition

La stabilisation est une modification dans le mélange ordinaire (terre-eau-air) de la brique qui touche les propriétés de la terre pour obtenir des caractéristiques favorables. Selon (Houben, 2006), la stabilisation est un phénomène complexe à cause de différents paramètres interviennent par exemple : les propriétés de la terre, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet.

### **1.6.2. Les objectifs**

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

1. La réduction de la porosité et les variations de volume.
2. La réduction du retrait et le gonflement à l'eau.
3. Augmenter les résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement. (Obtention de meilleures caractéristiques mécaniques)
4. L'obtention d'une meilleure cohésion.
5. L'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de pluie.

### **1.6.3. Les procédés**

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

#### **1.6.3.1. Stabilisation mécanique**

La stabilisation du sol par compactage est utilisée comme un terme général pour la stabilisation mécanique. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques développées malgré qu'il reste sensible à l'eau. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la texture de la terre. Alors ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

#### **1.6.3.2. Stabilisation physique**

La stabilisation physique peut se faire : premièrement modification des propriétés des sols par une augmentation des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Alors, les propriétés d'une terre être modifiées sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différents (argile et sable). Deuxièmement, l'ajout des fibres végétales à la terre argileuse, dans ce cas, renforce directement la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer ou de subir le retrait de l'argile.

(Bengraa, 2004 ; Bensalem Ahmed, 2010) étudient l'évolution du potentiel et la pression de gonflement d'une argile par ajout de sable à des granulométries différentes et à différents taux de sable. Il a distingué une réduction importante du gonflement

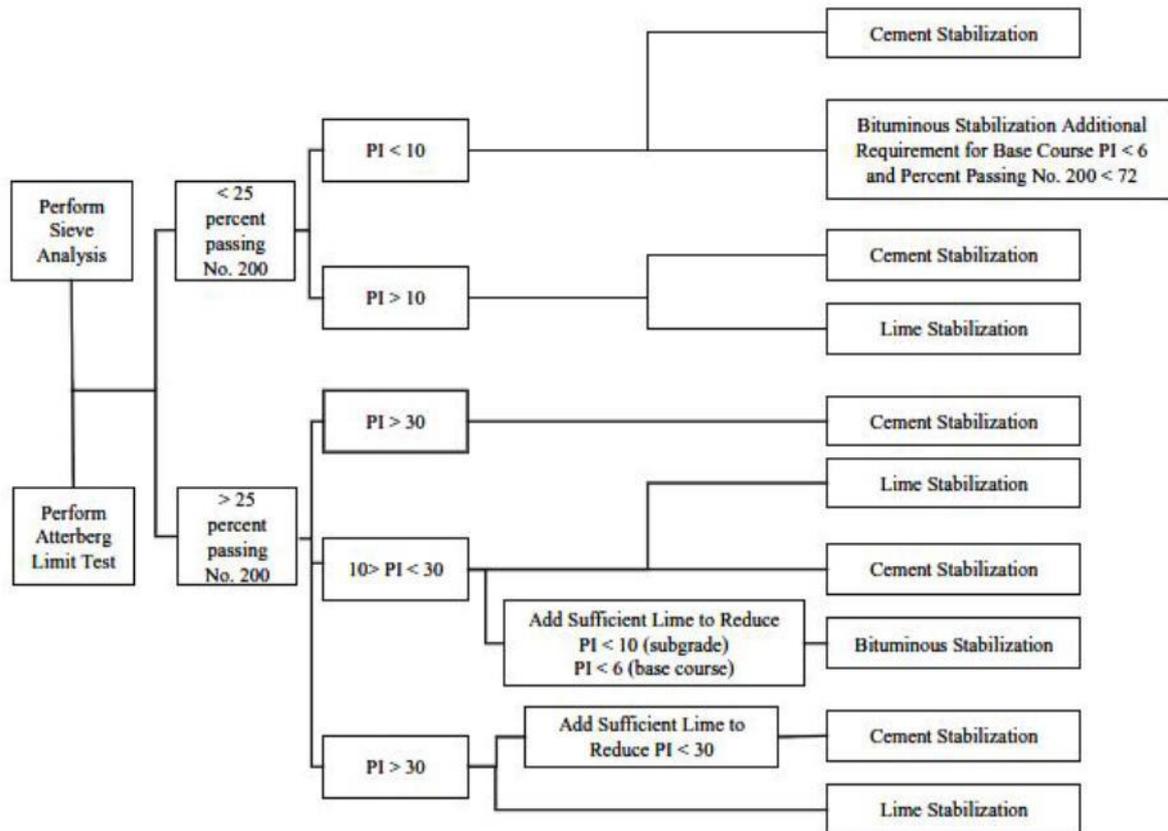
### 1.6.3.3. Stabilisation chimique

La stabilisation de la terre est influencée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés. Il a fait d'une réaction physico-chimique entre les particules de la terre et l'ajout, ou bien la création d'une matrice qui lie les particules. La quantité et le choix du produit chimique se dépendent en la nature de sol (Akpodje, 1985). Il existe deux manières de traitement du la terre parle produits chimiques : dans la masse et traitement de surface. De nombreux stabilisants chimiques existent des améliorations différentes à la terre selon leur propriété.

D'après (Bensalem Ahmed, 2010), la stabilisation chimique est basée sur l'utilisation de produits chimiques ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre et de réduire les phénomènes d'échange indésirables. Ils sont deux types :

- Les liants organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère)
- Les liants hydrauliques (ciment, chaux, Les liants hydrauliques routiers (LHR), cendres volantes, pouzzolane)

La figure1.18 permet ainsi de déterminer le choix de la stabilisation hydraulique basé sur le passants N°200 et l'indice de plasticité.



**Figure 1.19 :** Choix de la Méthode de stabilisation d'Après (Curin et al. 1976 ; Bensalem Ahmed, 2010).

Selon (Taallah, 20014 et Izemmouren, 2016) et d'autres recherches sur la stabilisation de la terre, la chaux a été justifié comme un stabilisateur hydraulique.

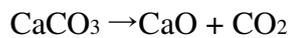
#### 1.6.4. Stabilisation des sols à la chaux

La stabilisation des sols a été développée à partir de 1920, aux U.S.A. Ce sont depuis lors des millions de mètres carrés des routes qui ont été réalisés en sol traité à la chaux et l'expérience acquise est très importante. Fort Worth, qui ouvert en 1974, couvre une superficie de 70km<sup>2</sup> est l'une des applications les plus spectaculaire de cette technique : 300 000 tonnes de chaux. Selon (Houben, 2006). On ne compte plus les applications de sol-chaux stabilisation dans le domaine des travaux publics que celui du bâtiment.

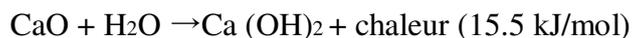
D'après (Haras nationaux, 2004), on utilise la chaux aérienne qui produit un abaissement plus important de la teneur en eau mais qu'il est plus délicat à manipuler (3% de chaux vive aux mêmes effets que 4% de chaux éteinte).

Selon (Izemouren, 2016), on distingue différents types de chaux utilisées dans la stabilisation des sols :

- 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 suivante :



- 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 suivante :



- La chaux hydraulique est obtenue à partir de calcaires contenant plus de 6 % d'argile. A température entre  $800$  et  $1500^\circ\text{C}$ , le  $\text{CaO}$  du calcaire se combine avec des éléments des silicates de calcium, des aluminates et des fero-aluminates de calcium.

#### 1.6.4.1. Mécanismes de réactions sol – chaux

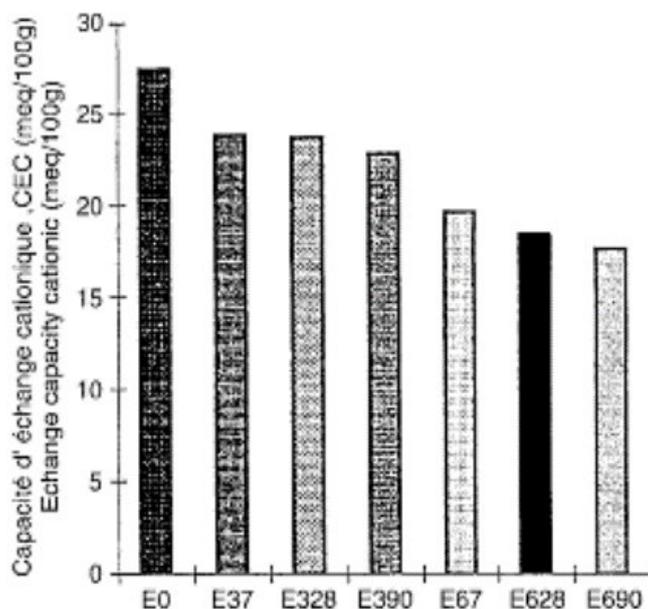
Pour modifier les propriétés des sols fins et des fractions fines des sols grenus, la chaux est très utilisée pour cette modification. Elle est efficace et utilisable dans le traitement des sols plastiques capable de prendre une grande quantité d'eau.

Le mélange chaux-sol-eau déclenche plusieurs réactions. Les réactions de l'échange cationique et la floculation augmentent la plasticité, la maniabilité, la résistance et la déformation du sol stabilisé. Les réactions pouzzolanique peuvent aussi avoir lieu, en 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.

### a. Capacité d'échanges cationiques

En générale, cette phase de floculation produit des sols faciles à malaxer, à travailler, et à compacter. Ces réactions immédiates sont principalement responsables de la réduction du retrait et du gonflement du sol. D'après (Holtz, 1969 ; Bensalem Ahmed, 2010), l'ajout de 3% à 5% de chaux par poids sec de sol est recommandé pour réaliser des chargements considérables. Ces réactions d'échange cationique sont réputées être réversibles.

Selon (Eades et Grimm, 1960), pratiquement tous les sols fins sont traités à la chaux. En présence de l'eau apparait des réactions d'échange cationique et de floculation-agglomération, Cette réaction produit des modifications dans les propriétés et la structure du sol par échange cationique et par floculation ce qui provoque des augmentations immédiates dans la plasticité du sol, sa maniabilité, sa résistance et sa déformation. D'après (M. Afes, G. Didier, 2000) figure 1.18, les résultats obtenus, pour les différents échantillons d'argile naturelle traitée à 3 et 6% de chaux, montrent que la CEC (capacité d'échange cationique) diminue légèrement à mesure que le pourcentage de chaux ajoutée augmente.



**Figure 1.20 :** Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux.  
(M.Afes, G. Didier, 2000)

### b. Réaction pouzzolanique

(Terrel et al, 1979) déclarent que la réaction pouzzolanique est présentée par deux réactions entre la chaux, l'eau, et les silicates, et aussi entre la chaux, l'eau, et les aluminates des sols argileux. Avec le temps, elles donnent des agnets cimentant qui sont essentiellement les silicates de calcium hydratés ou les aluminates de calcium hydratés. La réaction pouzzolanique 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

Quand une quantité suffisante de chaux est rajoutée au sol, le pH du mélange augmente et quand il atteint 12,4 (pH de la chaux saturée). Les silicates et les aluminates des argiles deviennent potentiellement solubles et se détachent du minéral argileux. Ils réagissent alors avec le calcium de la chaux pour former des ciments qui se consolident dans un processus graduel qui peut durer plusieurs années, (Eades et Grim, 1960).

### c. La carbonatation

La réaction de carbonatation mène à une augmentation de résistance à long terme dans les sols stabilisés à la chaux. Selon (Choquette, 1988 ; Taallah, 2014), la carbonatation de la chaux est la réaction secondaire responsable de ladite stabilisation. Elle est la réaction entre cette dernière et le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium.

Cependant, il est recommandé qu'avant le mélange, l'exposition de la chaux à l'air doit être évitée par des méthodes de mise en œuvre adéquates. (Chou, 1987 ; Bensalem Ahmed, 2010).

#### 1.6.4.2. L'effet de la chaux sur les résistances mécaniques du matériau terre

(Akpokodje, 1985 ; Symons, 1999 ; Taallah, 20014) explique que la résistance en compression simple améliore considérablement avec l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols. L'effet de la chaux entre les particules des argiles se manifeste par des augmentations dans les propriétés de déformations et de résistance mécanique. Ces augmentations, qui sont en grande partie le résultat de la floculation des particules, facilitent la circulation des engins et offrent une plateforme stable de travail pour tous les équipements de la construction.

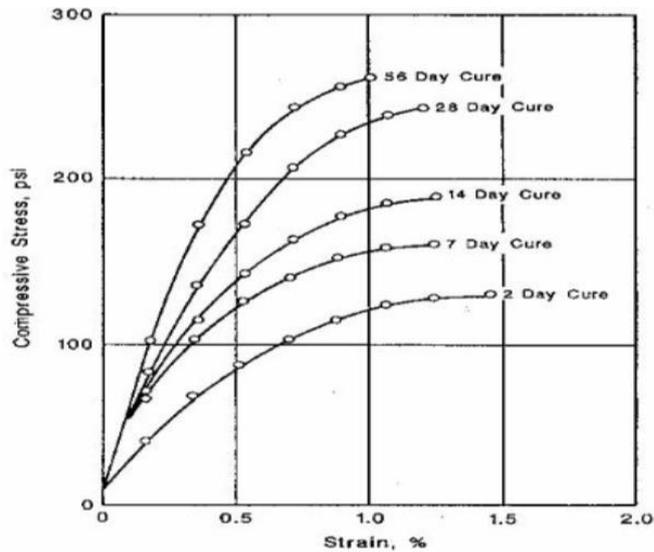
La résistance mécanique des mélanges sols-chaux est influencée par plusieurs facteurs tels que le type de sol, le type de chaux et la quantité utilisée, le temps de cure et la température, la teneur en eau, le poids unitaire, le temps écoulé entre le malaxage et le compactage. (Ingles et Metcalf, 1972) ont noté que les argiles montmorillonitiques donnent de plus faibles résistances avec la chaux dolomitiques qu'avec des chaux semi hydrauliques ou à haute teneur en calcium. D'un autre côté, l'argile kaolinitique produit de plus hautes résistances avec les mélanges à la chaux semi hydraulique et de plus faibles résistances sont obtenues avec la chaux à haute teneur en calcium. La modification de la résistance est affectée par le taux de chaux et le temps. Les performances à long terme des chaussées stabilisées à la chaux ont été validées par Kentucky Transportation Center, (2002).

(Little, 1995) et (Ausroads,1998) Montre que l'augmentation de la résistance du sol traité à la chaux avec le temps dans les figures 1.17 et 1.18.

(Laguros et al, 1956 ; Bensalem Ahmed, 2010) montrent que la résistance d'un sol stabilisé croît rapidement notamment les 7 premiers jours de cure, ensuite elle augmente plus lentement à un taux plus ou moins constant pendant 15 semaines environ.

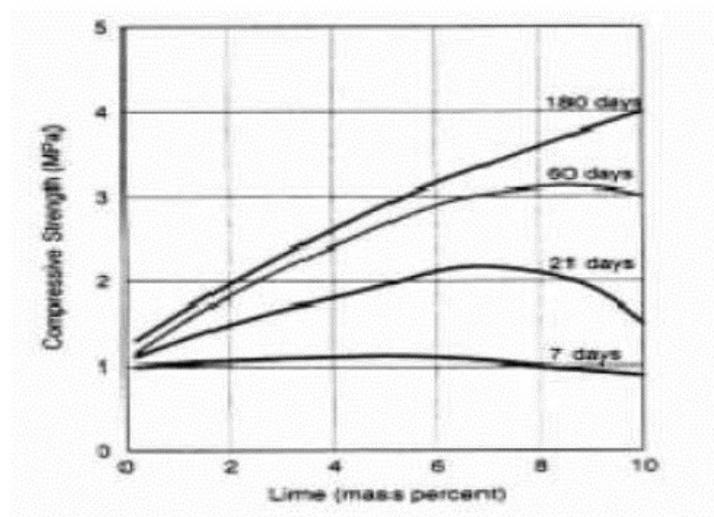
D'après (Ausroads,1998), des teneurs élevées en chaux ne donnent pas nécessairement des résistances initiales élevées. La figure 1.18 montre la variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps. Il indique que le gain de résistance précoce (résistance à 7 jours) est faible.

(Millogo, 2008) indique que des teneurs en chaux plus de 12 % dans le sol qui n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance des échantillons de l'adobe. Des résultats similaires sont présentés dans la figure 1.22.

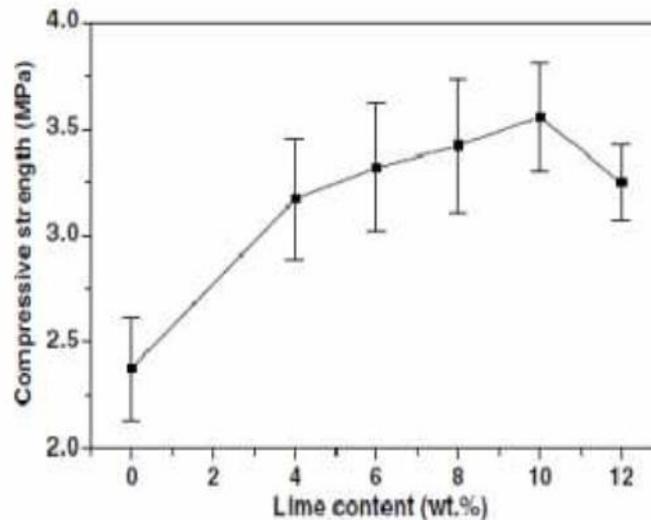


Change in stress-strain characteristics over time for a reactive, lime-stabilized soil (Goose Lake clay) (Little, 1995).

**Figure 1.21 :** Effets de la teneur en Chaux sur la résistance à la compression en fonction de l'âge.  
(Little, 1995)



**Figure : 1.22:** La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge  
(Ausroads,1998).



**Figure : 1.23:** Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux (Millogo ,2008)

## 1.7. DECHET DE BRIQUE

### 1.7.1. Introduction

Le déchet de brique est appelé aussi « Briquillons », « Chamotte » ou « Brique concassé ». Il y'a pas beaucoup de données sur l'emploi de déchet de brique, leur consommation universelle de matière première (Brique), leur utilisation comme granulats du béton, en conséquence leur génération en quantités énormes. Les recherches en Algérie sur les matériaux est presque rare. Lorsqu'on dit « Briquillons » on réfère aux briques morcelées provenant à cause de la démolition ou d'une mauvaise cuisson de brique. « Chamotte » est la brique cuite broyée ou concassée. (Barkat Abderezak, 2006).

(Harbi. R, 2009) montre que les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes où cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions.

### 1.7.2. Définition de la brique

La brique de terre argileuse crue et séchée au soleil ou cuite au four, utilisé comme un matériau de construction. Elle est un parallélépipède rectangle. L'argile est souvent mêlée de sable.

### 1.7.3. Technique de la production de la brique

La production de la brique, est un travail complexe qui permet une production en grande quantité à des coûts raisonnables, demande une parfaite organisation ; c'est la raison qui, sans doute, explique qu'il a fallu attendre la naissance, au troisième millénaire avant J-C, Pour une société organisée, on envisage de cuire des briques, alors que la céramique existait depuis l'époque néolithique. (Manuel de sensibilisation, 2006). Il y a cinq étapes se succèdent dans la fabrication de la brique :

- **L'extraction de la terre**, jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle où furent inventées les premières excavatrices motorisées, se faisait à la pelle.
- **La préparation de la pâte** : mélange d'une ou plusieurs terres argileuses, ou de limon, avec de l'eau et des éléments dits "dégraissants", comme le sable.
- **Le façonnage de l'antiquité**, on voit apparaître le moule, cadre de bois avec ou sans fond, aux dimensions de la brique à produire.
- **Le séchage** est, en effet, indispensable de faire sécher doucement la brique de terre crue, avant de la cuire. Ce séchage se fait actuellement en séchoir artificiel, mais autrefois, la brique était mise à sécher sous de vastes hangars à l'air libre.
- **La cuisson** est l'opération la plus délicate, la brique est mise à cuire dans un four.

### 1.7.4. Les caractéristiques physico-chimiques de la brique

Selon (Manuel de sensibilisation, 2006), les types d'argiles sont dans les briques cuites. Ils sont : les illitiques (couleur marron gris à rouge) les kaolinique et les bravaistiques (couleur orange à rose). Les éléments métalliques sont aussi trouvés dans la pâte argileuse. Ces éléments dits « réfractaires » le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (800° à 1000°) des fours à brique : la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de l'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Les déterminants de la couleur basique de la brique (les colorants) ce sont :

- 1- L'oxyde de fer.
- 2- L'oxyde de titane.
- 3- L'oxyde de manganèse.

Les fondants aussi ce sont à deux types :

- 1- Les oxydes alcalins (oxyde de sodium et potassium)
- 2- Les oxydes alcalino-terreux (chaux et magnésie)

Selon (Aissa Salem, 2016), la composition minéralogique de déchet de brique rouge a été déterminée par fluorescence X. le tableau 1.1 présente les résultats obtenus qui mettent en évidence des pourcentages élevés en silice et en alumine.

**Tableau 1.1** : Composition minéralogique de déchets de briques. (Aissa Salem, 2016).

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P.F
Pourcentages %	6.06	66.52	14.20	5.45	2.35	0.73	2.09	0.73	/	1.00

### 1.7.5. Le déchet de brique rouge Dans le béton

Les déchets de brique rouge peuvent être concassés pour produire des granulats d'un béton léger :

- 1- Structure pour semelles de fondation, parois de cave, éléments de construction au béton armé d'un poids spécifique de 1600 à 2100 kg/m<sup>3</sup>, une résistance à l'écrasement de 50 à 320 kg/cm<sup>2</sup>. Présentant une élasticité élevée à la pression et à la flexion composée, un faible coefficient de retrait, une faible conductibilité et dilatation bas.
- 2- Isolant poreux pour les parois. (Les parpaings et les carrelages avec des poids spécifique de 1000 à 1600 kg/m<sup>3</sup>, une résistance à l'écrasement de 20 à 50 kg/cm<sup>2</sup>, une résistance à la traction de 5 à 10 kg/cm<sup>2</sup>, des coefficients de retrait 0.20 à 0.30mm, une faible conductibilité de la chaleur.
- 3- Mono granulométrique du groupe 1/3mm. Dont on peut produire des bétons poreux de déchet de brique rouge présentant une isolation thermique poussée.

- 4- Béton non armé (damé) nécessaires aux fondations massives, fondation de murs, et la fabrication du béton de remplissage.
- 5- Les relèvements de routes sur les ponts, avec une densité faible.
- 6- La construction d'assises routières, comme matériau de remblaiement, l'aménagement paysage.
- 7- Le béton à base de brique présente une bonne résistance au feu. Le béton classique en générale ne résiste pas à des températures supérieures à 300°C.

Les bétons réfractaires sont capables de résister non seulement à des températures élevées mais à certaines corrosions chimiques qui sont utilisés pour la confection d'ouvrage à des températures élevées tels que : cheminées, revêtements des chaudières, de sols d'usines sidérurgiques, carreaux de cheminées.

(**Barkat Abderezak**, 2006) et les sources des briqueteries indiquent que les déchets de brique trouvent parfois des utilisations locales occasionnelle comme :

- 1- Plates formes en béton.
- 2- Chapes en mortier du ciment.
- 3- Étanchéité : forme de pente en isolation de toiture.
- 4- Réfection de planchers anciens.
- 5- Béton réfractaire utilisé pour revêtement des wagons de brique.

## 1.8. CONCLUSION

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que la brique de terre crue est utilisable vu ses significatives propriétés, de plus ce travail montre que la construction en terre crue a plusieurs avantages pour réaliser des différents édifices. On a cité aussi les différents types d'argiles et leurs caractéristiques.

Le présent chapitre a mis l'accent sur l'emploi de la chaux comme renfort dans le matériau terre, soit comme terrain de fondation ou comme matériau de construction. Enfin, on présente le déchet de brique rouge et son utilisation dans le béton.

L'intérêt, de ce présent travail, réside dans la stabilisation des briques d'Adobe par des matériaux poudreux comme la chaux.

**Chapitre 02 :**

**Caractéristiques des matériaux utilisés**

## 2.1. INTRODUCTION

À travers le premier chapitre, on a pu voir que les phénomènes physiques et chimiques jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique des briques de terre crue et sur leur stabilité. Donc une recherche sur les matériaux et les procédures en vue d'améliorer la qualité de notre type de brique s'avère indispensable.

La nature du sol et celle des liants et des ajouts utilisés comme stabilisants sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement du brique de terre crue. Donc pour étudier correctement les propriétés de l'adobe, dans cette partie on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants.

## 2.2. SOL :

Dans ce travail, nous avons cherché à optimiser deux matériaux de nature différente comme ajouts avec la chaux pour stabiliser notre type de brique : le sable concasser et le déchet de brique rouge.

Origine : la terre utilisée dans notre recherche trouve son appartenance dans la région de Biskra. Le critère de choix des lieux de prélèvement son : la disponibilité et l'abondance dans la région. La figure 2.1 montre le plan de situation du gisement.

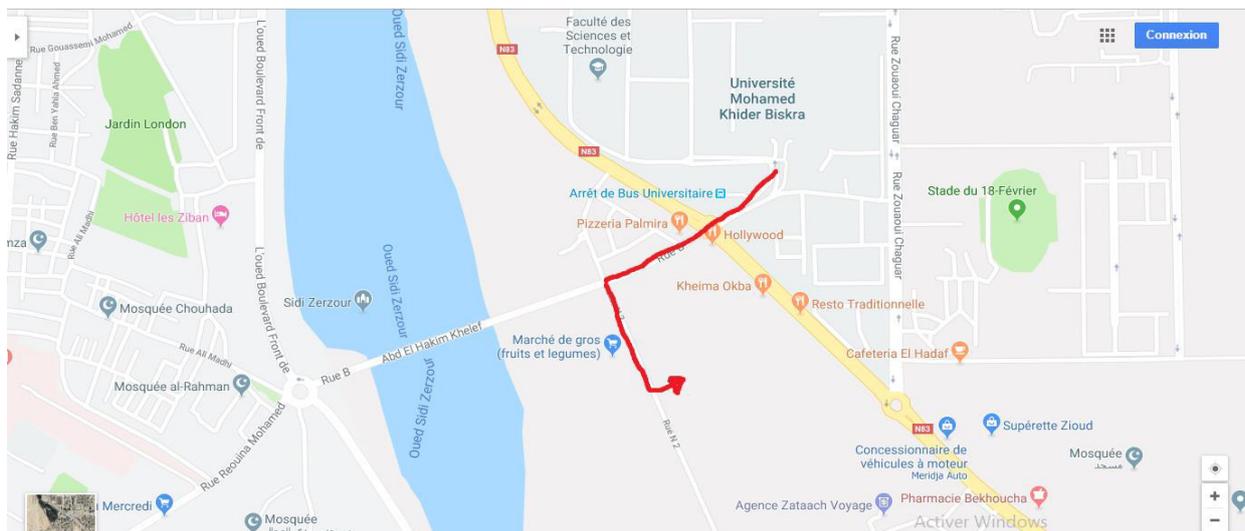


Figure 2.1 : Situation Géographique du Gisement de (SOL-BISKRA).

### 2.2.1. Caractéristiques physiques du sol :

Nous avons prélevé l'échantillon de sol à une profondeur de plus de 30 cm. Avant de soumettre les essais sur ce sol, il est écrêté à 2 mm. **Houben** indique que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10 mm ; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression. (Houben, 1994 ; Guettala, 2003)

#### 2.2.1.1. Densité des grains

##### a. Masse volumique absolue (ASTMC /28-73)

Elle est définie comme le quotient de la volumique absolue on procède par l'utilisation de pycnomètre.

$$M_{Vabs} = \frac{M_1 - M_2}{(M_1 + M_3) - (M_2 + M_4)} \dots \dots \dots (2.1)$$

Où :

- $M_1$  : masse de pycnomètre vide + la masse du matériau.
- $M_2$  : masse de pycnomètre vide.
- $M_3$  : masse de pycnomètre plein d'eau.
- $M_4$  : masse de pycnomètre plein d'eau+ la masse du matériau.

##### b. Masse volumique apparente (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** 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	2.610	1.29



**Figure 2.2** : Appareillage de mesure de la masse volumique apparente.



**Figure 2.3** : Appareillage de mesure de la masse volumique absolue.

### 2.2.1.2. Limites d'Atterberg

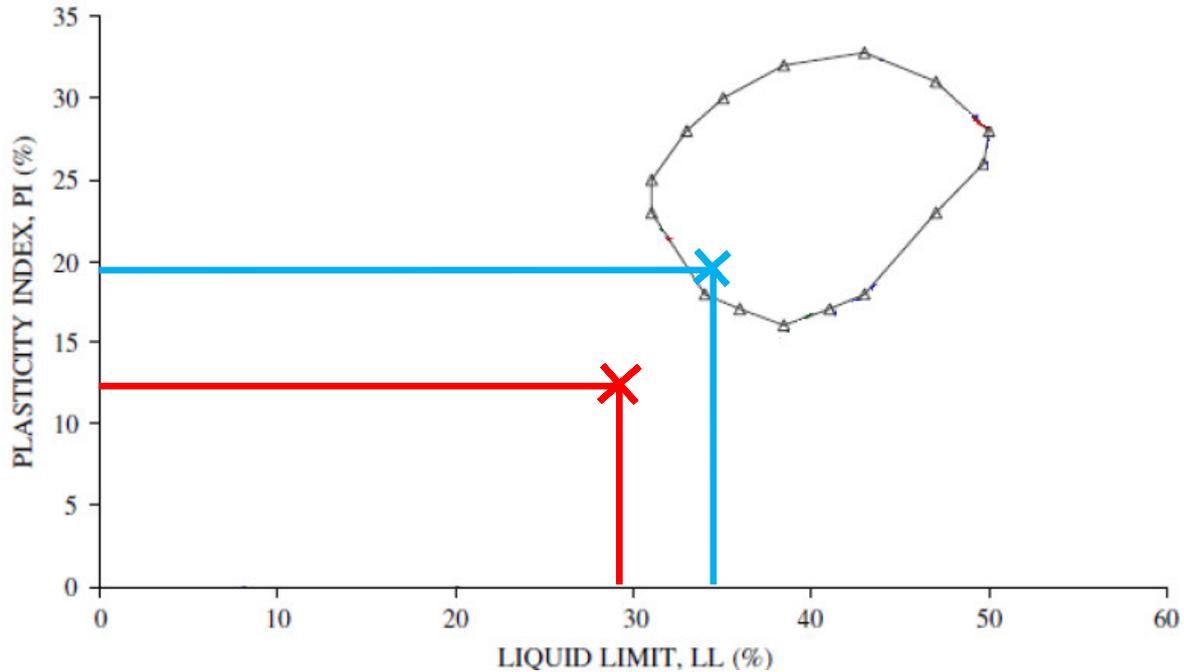
Les limites d'Atterberg ont été réalisées selon la norme (NF P 94-051) sur une fraction d'argile passant à travers le tamis N°40 (0,4mm). Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales qui caractérisent le sol, elles correspondent à des comportements particuliers. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

**Tableau 2.2** : Limites d'Atterberg de sol.

Limites d'Atterberg, (%)			
Sols	Limite de liquidité WL	Limite de plasticité WP	Indice de plasticité IP
Sol	29.45	16.22	13.23
Sol + Sable	34.02	15.98	18.04

Les résultats obtenus pour notre sol, montrent que les limites de plasticité ne sont pas dans les limites les mieux adaptés pour l'Adobe (figure 2.4).

Pour corriger le sol on a ajouté un pourcentage de 30% de sable concassé. Les résultats de la limite d'Atterberg sont présentés dans le tableau 2.2, ses résultats présentent un point dans la figure 2.4, ce point dans le fuseau adapté de l'Adobe donc la correction est juste.



**Figure 2.4 :** La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe (Jiménez Delgado MC et al., 2007 ; Izemmouren, 2016)

### 2.2.1.3. Composition granulaire

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol.

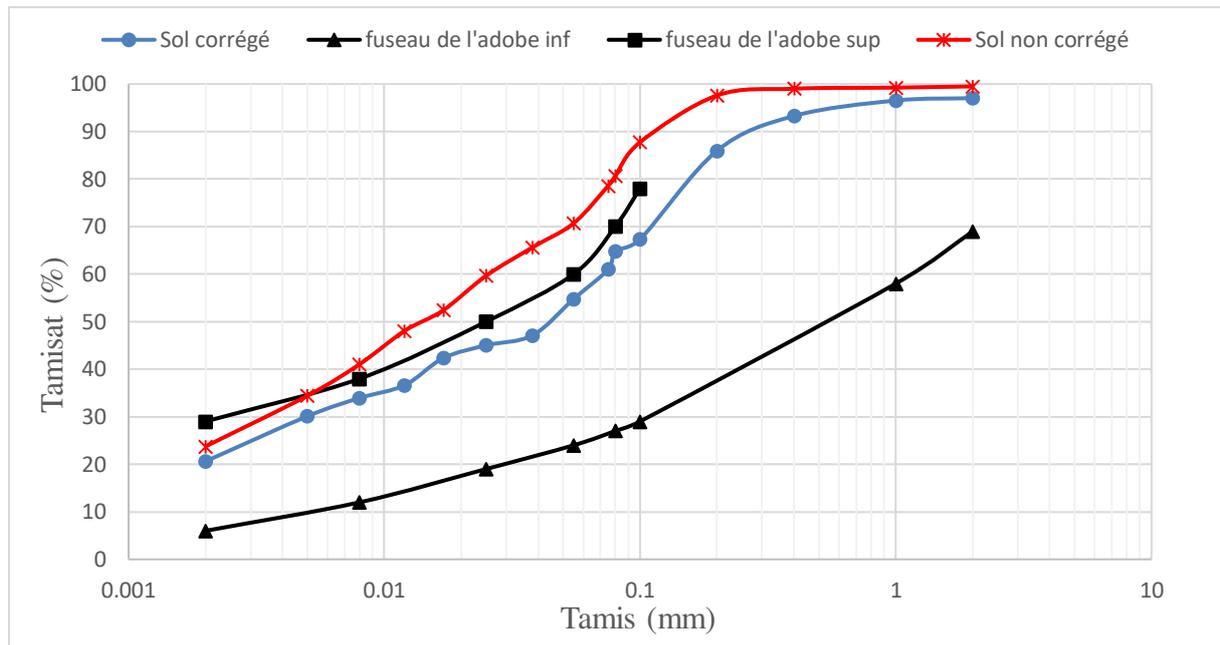
L'essai de granulométrie par tamisage à voie humide a été effectué sur un échantillon d'argile imbibée dans l'eau pendant une journée avant la réalisation de l'essai. Cet essai a été effectué selon la norme NF P 94-056.

Une fraction de passant du tamis (0,08mm) a été analysée par un essai de sédimentation selon la norme NF P 94-057.

On trouve que la courbe de l'analyse granulométrique du sol a été située à l'extérieur de la zone limite recommandée de l'Adobe (Figure 2.5).

Après l'ajout de 30% de sable concassé, on constate selon la courbe granulométrique du sol, qu'elle se situe bien dans la zone limite recommandée par la norme de l'Adobe. Les

résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique (Figure 2.5). Les essais ont été effectués aux laboratoires (MDC et MDS) de l'université de Biskra.



**Figure 2.5 :** Analyse granulométrique de sol après et avant l'ajout de 30% de sable concassé.

- **Classification du sol**

D'après l'essai de l'analyse granulométrique, les pourcentages des éléments passant à travers le tamis (0,08mm) avant et après la correction est supérieur à 50% indique que **le sol est fin**.

Selon la norme NF P 94-051, on remarque que l'indice de plasticité de notre sol avant la correction est égal à 13.23%. Donc ( $5 < I_p < 20$ ) le sol de Biskra c'est un sol **sable argileux**. Donc après l'ajout de 30% de sable concassé, l'indice de plasticité est égal à 18.04%. Alors c'est un sol **sable argileux** aussi.

La limite de liquidité et l'indice de plasticité du sol portés sur le diagramme de Casagrande se rencontrent en deux points situés au-dessus de la ligne A. Ce qui signifie que le sol est classé comme **une argile peu plastique Ap**.

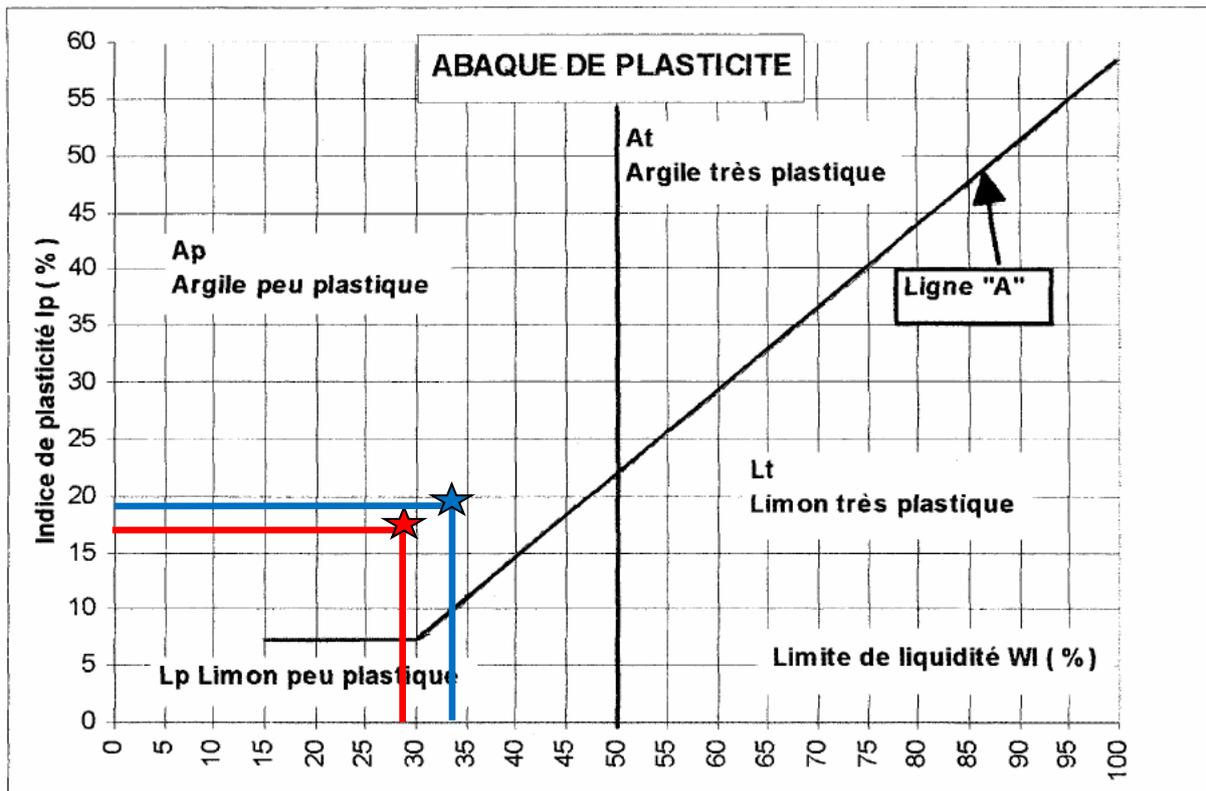


Figure 2.6 : Diagramme de plasticité (la norme NF P 94-051)

## 2.2.2. Analyse physico –chimique

### 2.2.2.1. Mesure du pH

Pour faire cet essai en utilisant le pH mètre de marque HANNA instruments PH 210 au laboratoire (MDS) du département de génie civil de l'université de Biskra.

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évolués ou carbonates. Pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6 un pré-traitement du sol est indispensable (Vilenkina, 1956 ; cité par Izemouren, 2016).

L'analyse de notre sol a montré que son pH est de 8.06, donc l'argile est une argile **basique**.



**Figure 2.7 :** Le pH du sol.

#### 2.2.2.2. Essai au bleu de méthylène (ANF P18 - 592)

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sol à adsorber du bleu de méthylène à la surface externe et interne des particules étudiées.

C'est un essai particulièrement adapté à l'étude des argiles ou fraction argileuse d'un sol qui présente, selon leur composition minéralogique, des surfaces spécifiques plus au moins importantes. Le test consiste à imbiber 30 grammes de sol dans 100 cm<sup>3</sup> d'eau distillée pendant une heure ; cette solution est ensuite agitée pendant cinq minutes et on injecte des doses successives bien déterminées de bleu de méthylène de 5 cm<sup>3</sup> dans la suspension de sol jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argiles. Au bout d'une minute, une goutte de solution est prélevée et déposée sur un papier filtre. Une auréole incolore indique que tout le bleu injecté a été adsorbé et une auréole bleue, que nous avons atteint le degré de saturation d'adsorption.

Cet essai a été conduit selon la norme française ANF P18-592 au Laboratoire de génie civil (MDS) de l'université de Biskra. Une valeur au bleu de méthylène de VBS a été présentée dans le tableau 2.3.

$$V_{BS} = 100 \times \frac{B \times C}{M_s} \dots\dots\dots (2.2)$$

Où :

- **B** : Masse du bleu introduite (grammes).
- **Ms** : Masse de l'échantillon à l'état sec
- **C** : concentration de la solution du bleu (0,1g/l)

**Tableau 2.3** : Valeur du bleu de méthylène

Echantillon	Valeur du Bleu $V_{BS}(g/ml)$	Classification du sol
Sol de Biskra	3.42	Limoneux, argileux



**Figure 2.8** : Auréoles bleues sur papier filtre (taches).

### 2.3. CHAUX

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, notamment dans la construction.

Dans cette mémoire on a utilisé la chaux vive ( $CaO$ ) produite par l'unité de chaux de Saida (Algérie). La composition chimique et les caractéristiques physique de la chaux vive sont présentées dans le tableau 2.4.

**Tableau 2.4** : les caractéristiques physiques et la composition chimique de la chaux vive (Saida ; Izemmouren, 2016).

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxydes	% massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	82.77	Masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	0.04681
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.63			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27			
SiO <sub>2</sub>	1.35			
MgO	1.88	Masse volumique apparente	g/cm <sup>3</sup>	0.4355
SO <sub>3</sub>	0.11			
K <sub>2</sub> O	0.15			
Na <sub>2</sub> O	0.06			

## 2.4. SABLE CONCASSE

Le sable concassé est le premier variant dans cette recherche. L'utilisation de ce sable généralement pour la correction granulaire du sol. Le sable utilisé est un sable concassé (0/3) provenant des carrières de la région de Biskra. Selon les normes **AFNOR (1996)**, on a déterminé les caractéristiques physiques du sable.

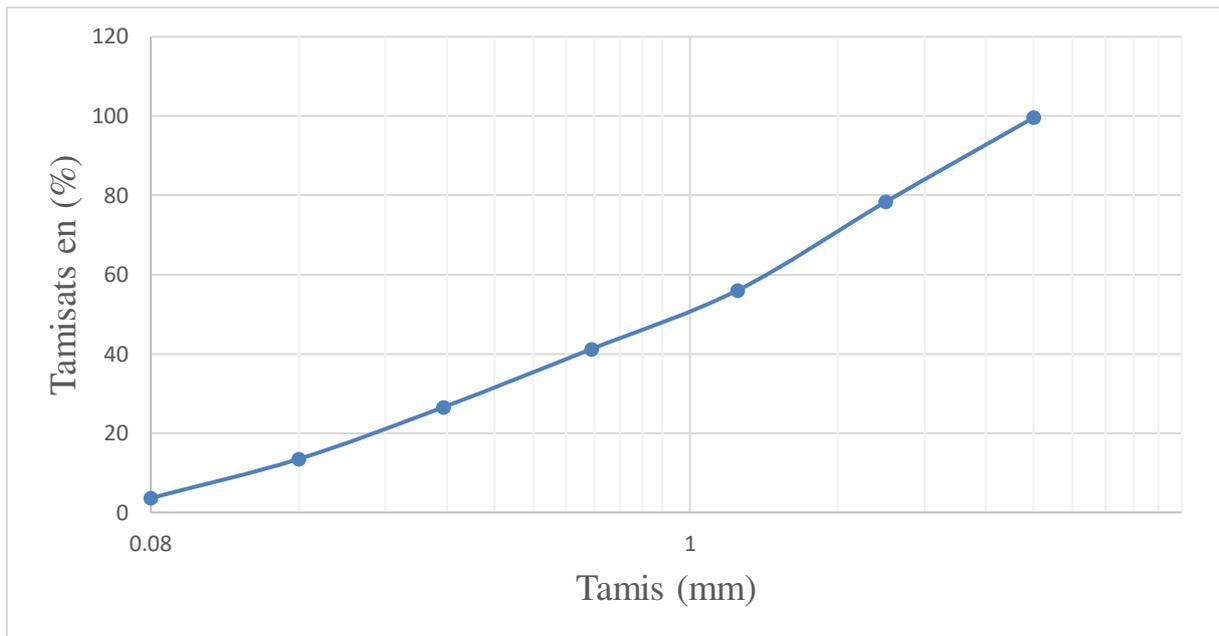
Les résultats de caractérisation sont présentés sur le tableau 2.5, et la composition granulaire du sable présenté sur la figure 2.9.

**Tableau 2.5** : Masses Volumiques du sable concassé et distribution de la taille des grains.

MV <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	MV <sub>abs</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Distribution de la taille des grains (%)		
		0.01-0.08 mm	0.08-1.25 mm	1.25-5 mm
1.60	2.61	13.486	64.841	21.373

**MV<sub>app</sub>** : Masse volumique apparente.

**MV<sub>abs</sub>** : Masse volumique absolue.



**Figure 2.9 :** Analyse granulométrique du sable concassé.

## 2.5. DECHET DE BRIQUE ROUGE

Le deuxième variant c'est le déchet de brique rouge, le broyage de brique faite au niveau du laboratoire MDC de l'université de Biskra par le broyeur (Los Angeles). La figure 2.10 représente les étapes de broyage de la brique utilisée dans cette recherche.



**Figure 2.10 :** broyage de la brique rouge

### 2.5.1. Caractéristiques physiques de déchet de la brique rouge

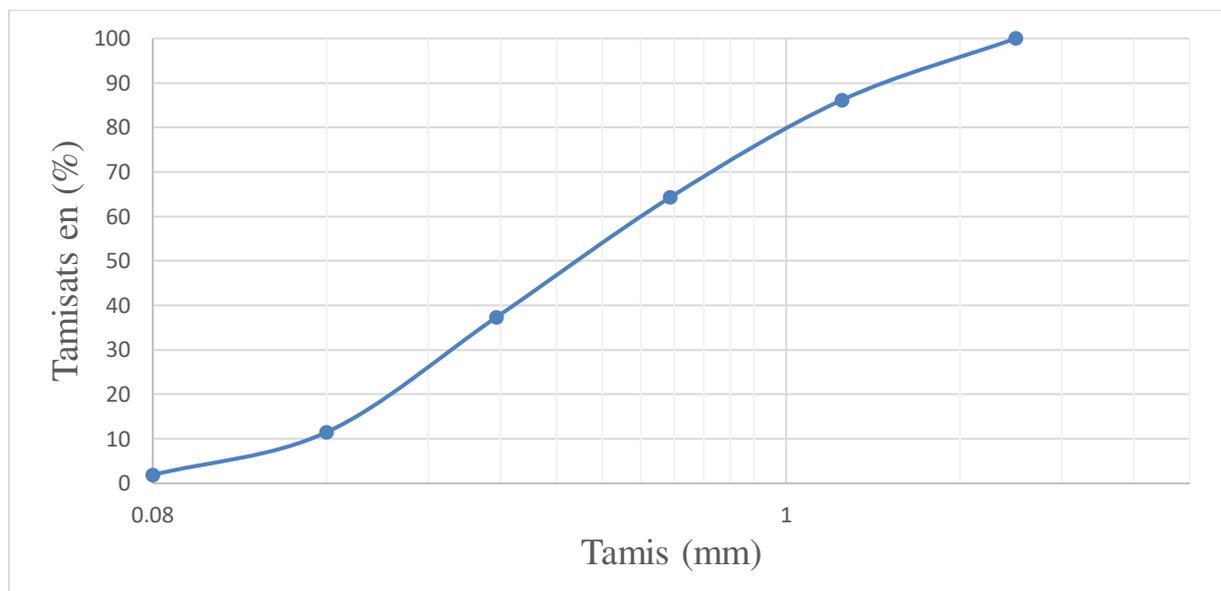
Les résultats de caractérisation sont présentés sur le tableau 2.6, et la composition granulaire du déchet présenté sur la figure 2.11.

**Tableau 2.6 :** Masses Volumiques du déchet de la brique rouge

$MV_{app}$ ( $g/cm^3$ )	$MV_{abs}$ ( $g/cm^3$ )	Distribution de la taille des grains (%)		
		0.01-0.08 mm	0.08-0.63 mm	0.63-2.25 mm
1.24	2.26	11.527	74.661	13.8445

$MV_{app}$  : Masse volumique apparente.

$MV_{abs}$  : Masse volumique absolue.



**Figure 2.11 :** La composition granulaire du déchet

### 2.5.2. Influence du Pourcentage de déchet sur les Limites d'Atterberg

L'influence du pourcentage de déchet de brique rouge sur la limite de liquidité, la limite de plasticité ainsi que l'indice de plasticité a fait l'objet de l'étude. Les résultats sont représentés successivement pour des pourcentages de : 10%, 20% et 30% d'ajout.

Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.7.

**Tableau 2.7** : Limites d'Atterberg de mélange de (Sol + Déchet de brique rouge).

Déchet en %	Limites d'Atterberg, (%)		
	Limite de liquidité WL	Limite de plasticité WP	Indice de plasticité IP
10	20.11	15.87	4.24
20	20.12	14.08	6.04
30	20.4	13.42	6.98

## 2.6. CONDUITE DE L'ESSAI

### 2.6.1. Matériel spécifique

Les éprouvettes prismatiques et cubiques ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) et ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme objet de notre recherche, ont été confectionnées dans des moules spécialement usiné à cet effet. Presque tous les essais ont été effectués sur des briques cubique de dimension ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) et un seul essai (essai de traction) été effectués sur des briques prismatique de dimension ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ).

- Pour le moule cubique le démoulage est effectué par tirez le moule ver le haut.
- Pour le moule prismatique le démoulage est effectué par ouverture du moule (dévissage des boulons).

**Figure 2.12** : Le moule utilisé pour le moulage et la confection des briques

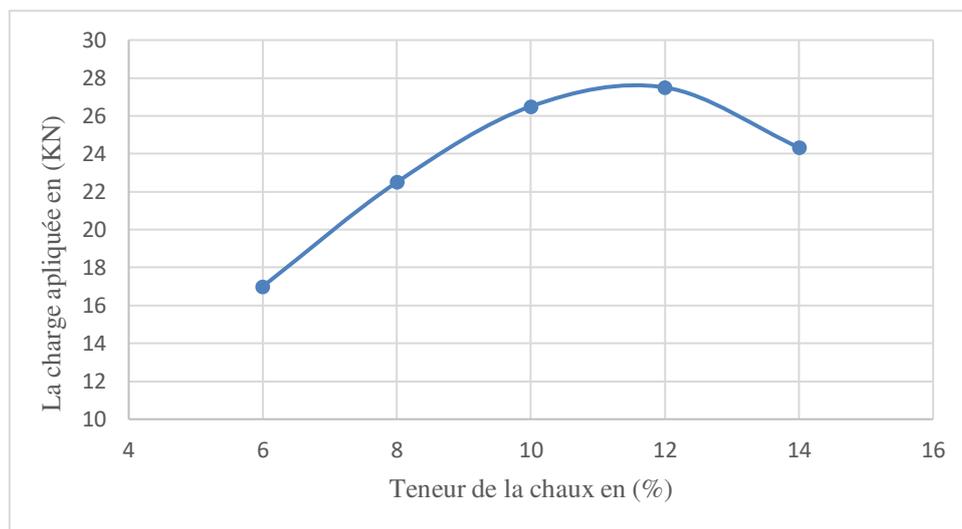
### 2.6.2. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes et les briques ont été confectionnées à partir d'un mélange homogène du matériau de base (sol de Biskra) et de produit de traitement. Pour la caractérisation du matériau, quelques paramètres essentiels ont été variés afin d'étudier leurs influences sur la résistance à la compression, à la traction par flexion ainsi que la sensibilité aux variations climatiques.

### 2.6.3. Optimisation de la chaux

La teneur en chaux optimale pour la brique peut être déterminée par essai de compression simple. Les pourcentages utilisés pour faire cette opération sont : 6%, 8%, 10%, 12% et 14%.

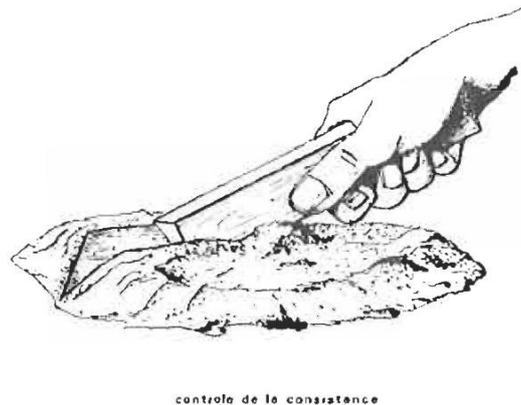
Les résultats de l'optimisation sont présentés dans la figure 2.13.



**Figure. 2.13 :** Optimisation de la teneur en chaux

### 2.6.4. Vérification de la teneur en eau

**CRA terre** (CRA terre, 1979) a signifié dans le cas d'un moulage manuel, pour vérifier si la teneur en eau est correcte, il existe un moyen assez simple, qui consiste à tracer un sillon en (V) de 8 cm de profondeur dans le mélange, à l'aide d'un bâton taillé en coin. Celui-ci doit laisser une trace nette. Les parois du sillon se gonflent et tendent l'une vers l'autre sans se toucher.



**Figure. 2.14 :** Contrôle de la teneur en eau (CRA terre, 1979).

### 2.6.5. Mélanges

Afin d'optimiser les caractéristiques physiques des briques de terre crue, nous avons opté la composition des mélanges des briques présentées dans le Tableau 2.8.

**Tableau 2.8 :** Composition des mélanges.

	Sol en (%)	D.B.R (%)	S.C en (%)	Chaux en (%)
	Par rapport au mélange sec (T+S ou T+B)			Par rapport au mélange total sec
<b>BAD de 10%</b>	90	10	0	12
<b>BAD de 20%</b>	80	20	0	12
<b>BAD de 30%</b>	70	30	0	12
<b>BAS de 10%</b>	90	0	10	12
<b>BAS de 20%</b>	80	0	20	12
<b>BAS de 30%</b>	70	0	30	12

Les abréviations sont les suivantes :

- **BOR** : la brique de référence (Ordinaire ou témoins).
- **BAS** : Brique d'Adobe Stabilisé.
- **DBR** : Déchet de Brique Rouge.
- **SC** : Sable Concassé.
- **BAD** : Brique d'Adobe avec un dosage de Déchet de brique rouge.
- **BAS** : Brique d'Adobe avec un dosage de Sable concassé.

### 2.6.6. Préparation des mélanges

Les matériaux (sol + stabilisants) sont d'abords malaxés à sec dans un malaxeur avec une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant trois minutes. Puis mélangée ces compositions manuellement avec un pourcentage d'eau.



Figure 2.15 : malaxeur de marque SIGMA

### 2.6.7. Mode de conservation :

#### Cure à l'étuve

La conduite de la cure devra être adaptée d'une part aux conditions hygrométriques et d'autres parts à la nature des briques de terre crue. Les conditions de séchage et la cure sont déterminées en fonction des valeurs d'évaporation constatées localement durant la période considérée. Les éprouvettes, ont été conservées dans une atmosphère (humidité relative de l'air >70%) pour favoriser au maximum l'hydratation du liant utilisé. A cet effet, nous avons utilisé le procédé suivant : après confection, les éprouvettes sont couvertes d'un tissu en plastique dans l'étuve à  $T = 60 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 7 jours puis séchées sans le plastique dans l'étuve à  $T = 60 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à un poids constant (Taalla, 2014).



a) Des éprouvettes couvertes



b) Conservation dans l'étuve avec le couvert



c) Conservation dans l'étuve sans le couvert

**Figure. 2.16 :** Conservation des blocs au laboratoire

## 2.7. RESISTANCES MECANIQUES

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

### 2.7.1. Essai de compression simple

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cubiques de différentes dimensions ou sur des cylindres. Conformément à la norme.

Pour nos essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ , à l'aide d'une presse. La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S} \dots\dots\dots (2.3)$$

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

**F** : Charge maximale supportée par les blocs (KN).

**S** : Surface moyenne des faces d'essai en cm<sup>2</sup>.



**Figure 2.17** : Essai d'écrasement de les éprouvettes cubique.

### 2.7.2. 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). La résistance en flexion R<sub>f</sub> (en N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Où :

- **f<sub>cf</sub>** : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.
- **d<sub>1</sub>** et **d<sub>2</sub>** : 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.

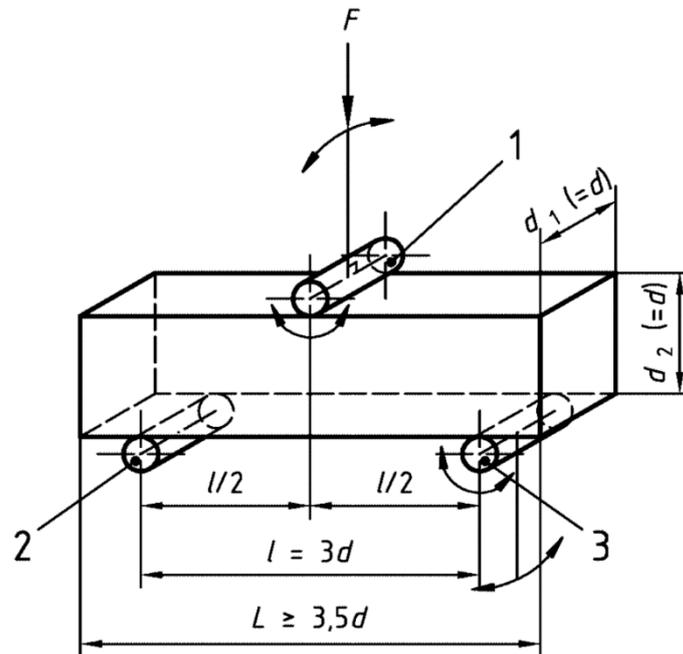


Figure 2.18 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (NF EN 12390-5).



Figure 2.19 : L'essai de résistance à la flexion.

## 2.8. LA DURABILITE

### 2.8.1. Gonflement

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

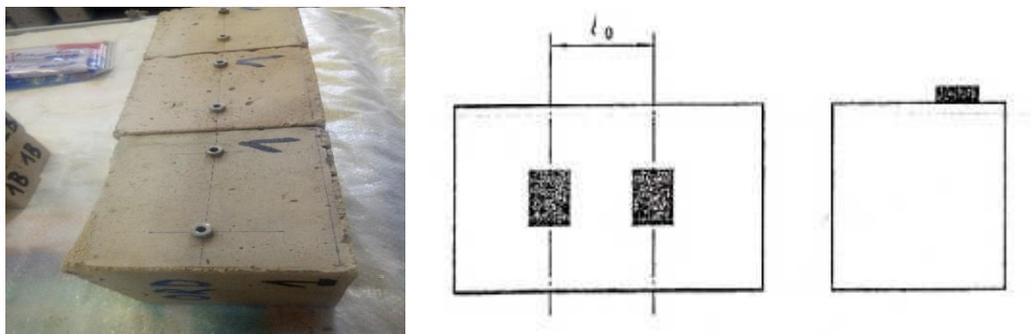
- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure selon la figure 2.20.
- Mesurer la distance entre plots :  $l_0$ .

- Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.20.
- Après 96 heures (4 jours) d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots :  $l_1$ .

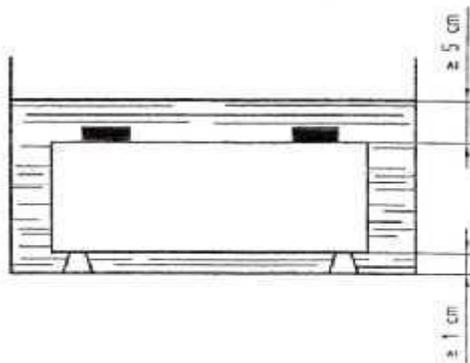
L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta L_g \text{ (mm/m)} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \dots \dots \dots (2.5)$$

- $l_0$  : la distance avant immersion.
- $l_1$  : la distance après immersion.



**Figure 2.20** : Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901)



**Figure 2.21** : L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901)

### 2.8.2. L'absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaire des éprouvettes de B.T.C non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai de Sportivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  place dans un bac contenant de l'eau, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur presque de 5mm de la profondeur du bac. On

mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps la formule suivante :

$$C_b \left( \frac{g}{cm^2 \sqrt{min}} \right) = \frac{100 \times P}{S \sqrt{t}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Où :

- **P** : ( $M_h - M_d$ ) Poids d'eau absorbée en (g).
- **t** : Le temps en heures ( $t = 10$  min).
- **S** : Surface de la face sciée ( $100 \text{ cm}^2$ ).



**Figure 2.22** : Essai d'absorption capillaire d'eau

### 2.8.3. L'absorption totale

(Bungey et Millard, 1996 ; Izemmouren, 2016) indiquent que 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 :

$$A(\%) = 100 \times \frac{P_h - P_s}{P_s} \dots\dots\dots (2.7)$$

Où :

- **P<sub>h</sub>** : poids de l'échantillon à l'état humide.
- **P<sub>s</sub>** : poids de l'échantillon à l'état sec.



**Figure 2.23 :** Immersion totale des blocs.

#### 2.8.4. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion des briques de terre crue s'effectue suivant la norme expérimentale NF XP 13-901. Il s'agit de soumettre un béton de terre crue à une érosion mécanique appliquée par frottement d'une brosse à pression constante sur un nombre de cycles donnés après une cure de 7 jours dans l'étuve.

Le brossage se fait à raison d'un aller et retour par seconde pendant une minute (soit 60 allers-retours. La largeur brossée du béton de terre comprimée ne doit pas excéder de plus de 02mm la largeur de la brosse). De cet essai est déduit le coefficient d'abrasion ( $C_a$ ) de la brique qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion.

$$C_a(\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S}{m_0 - m_1} \dots\dots\dots (2.7)$$

Où :

- $C_a$  : 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 2.24** : Essai de résistance à l'abrasion.

## 2.9. CONCLUSION :

Les essais physiques et les analyses chimiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des briques qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux

**Chapitre 03 :**

**Résultats et Discussions**

### 3.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les briques d'Adobe confectionnées selon les différentes combinaisons d'ajouts (chaux vive, sable concassé et déchet de brique rouge).

On a utilisé les abréviations suivantes :

- BA** : Brique d'Adobe.
- BOR** : la brique de référence (Ordinaire ou témoins).
- BAS** : Brique d'Adobe Stabilisé.
- DBR** : Déchet de Brique Rouge.
- SC** : Sable Concassé.
- BAD** : Brique d'Adobe à base de Déchet de brique rouge.
- BAS** : Brique d'Adobe à base de Sable Concassé.
- ATE** : l'Absorption Totale d'Eau.
- RCS** : Résistance à la Compression Sèche.
- RTS** : Résistance à la Traction Sèche.
- RCBSC** : Résistance à la Compression pour les Briques à base de Sable Concassé.
- RCBDB** : Résistance à la Compression pour les Briques à base de Déchet de Brique rouge.
- RTBSC** : Résistance à la Traction pour les briques à base de Sable concassé.
- RTBDB** : Résistance à la traction pour les briques à base de Déchet de Brique rouge.

Dans ce chapitre nous allons analyser les résultats obtenus après la fin des essais expérimentaux. L'objectif est de définir les quantités appropriées des stabilisants afin d'attendre des briques stables c'est à dire des briques ayant une résistance acceptable et une durabilité vis-à-vis de l'eau.

Nous allons étudier l'influence du sable concassé et du déchet de brique rouge sur les résistances mécaniques (la résistance à la compression sèche et la résistance à la traction sèche) si les résultats de ces essais sont acceptables, nous passons aux essais de durabilité (Absorption totale et capillaire, gonflement par immersion, résistance à l'abrasion) des briques d'Adobe à base d'un sol de la région de Biskra (EL Alia).

La stabilisation physique du sol est réalisée par un sable concassé et le déchet de brique rouge. La stabilisation chimique est obtenue par l'introduction de 12% de la chaux vive.

Les teneurs des stabilisants sont les suivantes :

- Stabilisation mixte (chaux+ sable concassé)
  - (12% + 0%), (12% + 10%), (12% + 20%), (12% + 30%).
- Stabilisation mixte (chaux+ sable concassé)
  - (12% + 0%), (12% + 10%), (12% + 20%), (12% + 30%).

Les résultats obtenus à partir des essais effectués seront analysés en vue d'identifier des tendances générales en comparant l'exécution des briques traités uniquement en chaux et des briques améliorés (traitement mixte (chaux + sable concassé), (chaux + déchet de brique rouge).

Les normes courantes en vigueur et les caractéristiques d'exécution initiales des matériaux semblables seront prises en considération.

En conclusion, les résultats sont utilisés pour valider ou situer les prétentions théoriques établies dans le premier chapitre de ce mémoire.

Tous les essais expérimentaux ont été entrepris par des procédures standard pour assurer l'exactitude, la répétitivité et la reproductibilité.

## **3.2. EFFET DU DOSAGE DE SABLE CONCASSE ET DE DECHET DE BRIQUE ROUGE SUR LES RESISTANCES MECANIQUE**

Afin d'étudier l'effet du dosage de DBR et le SC sur les résistances mécaniques des briques d'Adobe, on a ajouté au sol quatre pourcentages (0%, 10%, 20% et 30%) de sable concassé et de déchet de brique par rapport au poids du sol, les briques ont été stabilisés par 12% de chaux vive et conservées à l'étuve avec une température de  $(65 \pm 2 \text{ C}^\circ)$  pendant 7 jours. Avant de procéder à des essais sur les briques d'adobe, ils doivent être sécher à l'étuve jusqu'à une masse constante.

### **3.2.1. Résistance à la compression**

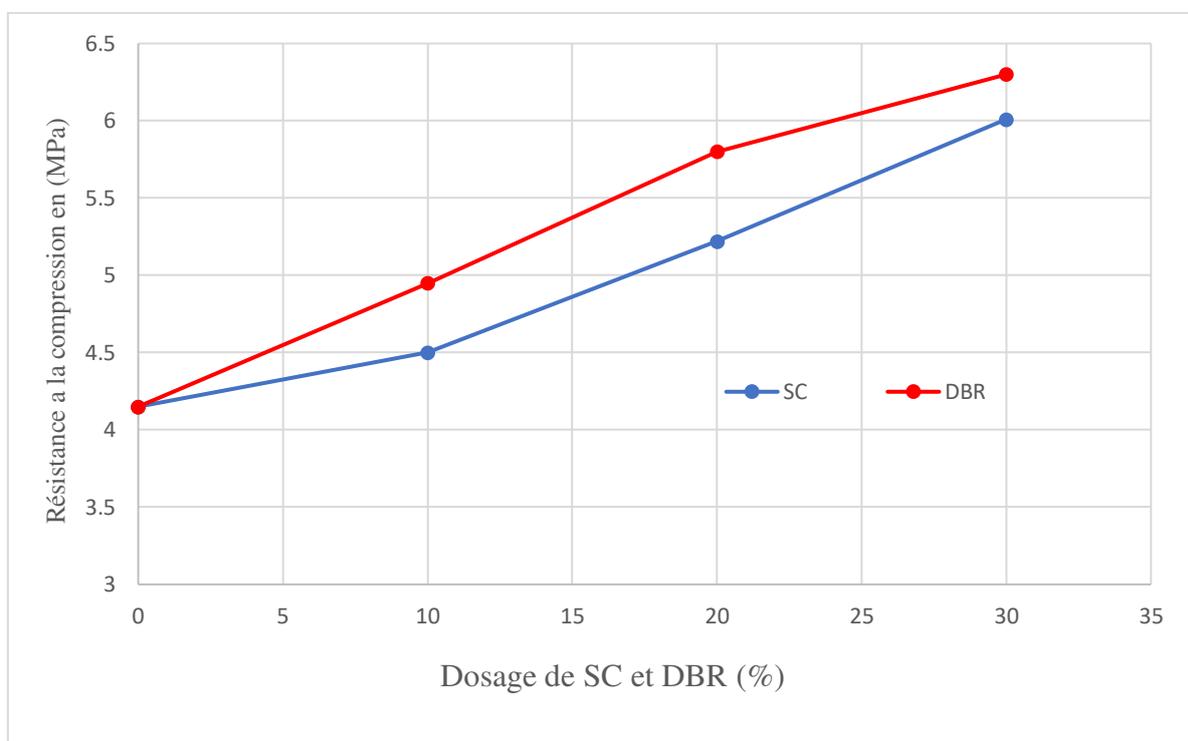
Selon (Houben et Guillaud, 1994), la résistance à la compression d'un brique est peut-être l'un des propriétés de la technologie la plus importante. On l'a établi dans la littérature que la durabilité des briques d'Adobe augmente avec l'augmentation de sa résistance.

La résistance à la compression exprimée par la capacité de la brique d'adobe, a résisté à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Les résultats de

l'essai de compression sont représentés dans la figure 3.1 par la moyenne de la valeur des trois éprouvettes.

**Tableau 3.1** : les valeurs de la résistance à la compression pour les **BAS** et les **BAD**.

Taux des matériaux (%) + 12% de chaux	RCBSC (MPa)	RCBDB (MPa)
0	4,15	4,15
10	4,5	4,95
20	5,22	5,8
30	6,01	6,3



**Figure 3.1** : Influence du dosage de **SC** et le **DBR** sur la résistance à la compression (12% de chaux)

Les courbes représentées sur la figure 3.1 peuvent en témoignées de l'influence très positive de l'effet du déchet de brique rouge et le sable concassé sur la résistance à la compression des briques d'adobes à savoir :

- La résistance augmente avec l'augmentation du dosage de **SC** et **DBR** jusqu'à 30%, ce pourcentage donnera la meilleure résistance pour **SC** et **DBR**.

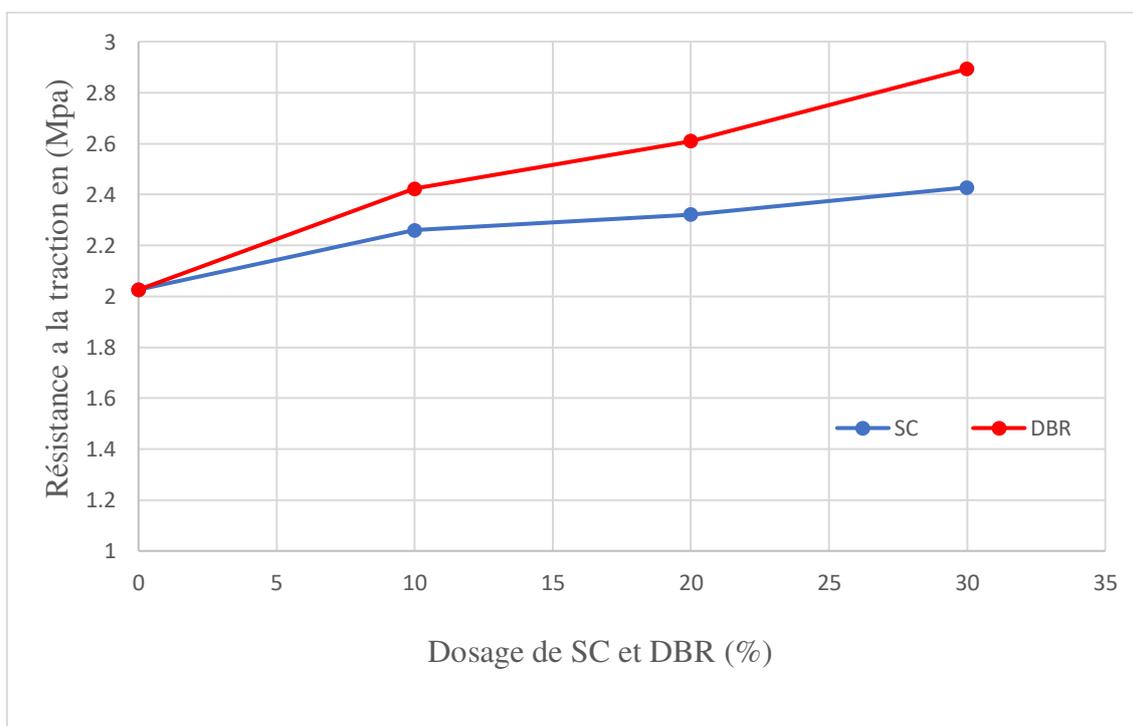
- Pour le graphe de déchet de brique rouge l'évolution de la résistance est plus importante que pour le graphe de sable concassé. L'augmentation de la **RCS** des **BAD** pour 10, 20 et 30 % est de l'ordre, respectivement, de : 19.27%, 39.75% et 51.81%, par rapport au **BOR**. En revanche pour les **BAS** stabilisé par 10, 20 et 30 % de SC est de l'ordre, respectivement, de : 7.77%, 20.49% et 44.82%, par rapport au **BOR**.
- En termes des valeurs moyennes, l'évolution de la résistance à la compression est variée entre 4.15 MPa et 6.3 MPa pour le **DBR** et entre 4.15 MPa et 6.01 MPa pour le **SC**

### 3.2.2. Résistance à la traction

Il est nécessaire de connaître le comportement à la traction des briques d'adobe puisque les constructions en terre sont aussi sollicitées en traction et en cisaillement dans le cas de vent important, de séisme.

**Tableau 3.2** : les valeurs de la résistance à la traction pour les **BAS** et les **BAD**.

Taux des matériaux (%) + 12% de chaux	RTBSC (MPa)	RTBDB (MPa)
0	2,026	2,026
10	2,26	2,423
20	2,321	2,61
30	2,428	2,893



**Figure 3.2** : Influence du dosage de **SC** et le **DBR** sur la résistance à la traction (12% chaux)

L'analyse des courbes de la figure 3.2 montre que :

Une résistance relativement élevée avec l'augmentation du dosage de **SC** et **DBR**. La teneur de 30% de **DBR** donne la meilleure résistance en traction pour tous les cas.

L'augmentation de la **RTS** est de l'ordre de 19.84 % et 42.79 % dans la gamme de 0 % à 30% d'ajout de **SC** et **DBR** respectivement. Comme dans le cas de la **RCS**, les meilleures valeurs de **RTS** sont obtenues par **BAD**. En effet, les valeurs de **RTS** sont : 2.026MPa et 2.893MPa pour 0% et 30% d'ajout de **DBR** respectivement. Ces valeurs importantes témoignent de l'effet bénéfique de ces ajouts sur le gain de résistance à la traction sèche.

### **3.3. EFFET DU DOSAGE DE SABLE CONCASSE ET DE DECHET DE BRIQUE ROUGE SUR LA DURABILITE**

Nous avons vu précédemment que l'ajout de (**SC** et **DBR**) eu un effet positif sur la résistance à la compression et la résistance à la traction des briques d'adobe. Ces résultats nous encourageons pour étudier sa durabilité avec l'ajout de **SC** et **DBR**.

La durabilité de la brique d'adobe est considérée comme la mesure de sa capacité de soutenir ses caractéristiques distinctives de résistance, de stabilité dimensionnelle et de résistance aux effets climatiques dans des conditions d'utilisation pendant sa durée de vie d'un brique et peut être considérée comme la période réelle durant laquelle aucune dépense excessive n'est exigé pour son entretien ou sa réparation. La vie de la conception d'un brique est la période réglée par concepteur du bâtiment auquel la brique fait partie.

(Guettala et al. 2005), ont montré que les conditions des essais de la durabilité des **BTC** en laboratoire semblent très sévères par rapport aux conditions climatiques naturelles. En effet, on va étudier la durabilité des briques d'adobes à partir de quelques essais de durabilité dans le laboratoire.

Tous les résultats sont présentés comme suit :

#### **3.3.1. Absorption d'eau**

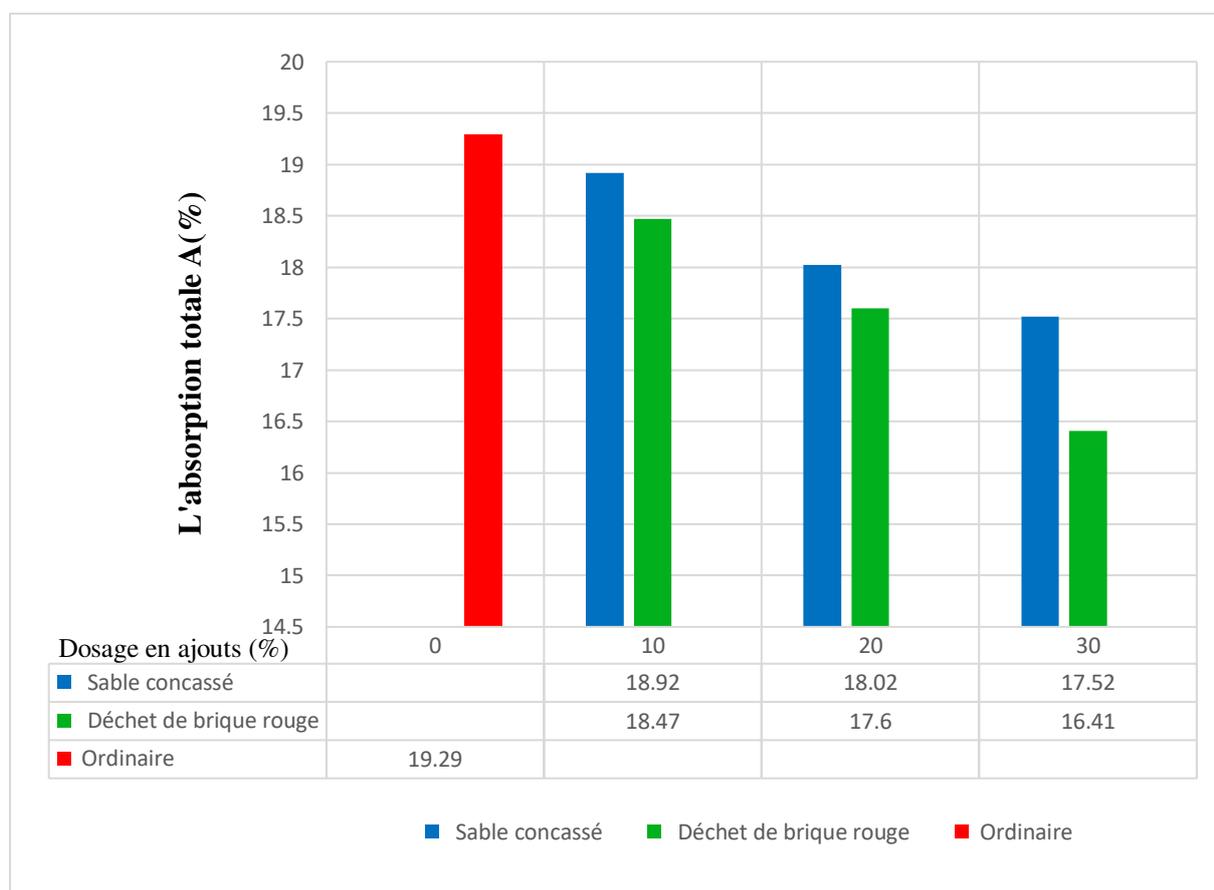
##### **3.3.1.1. Absorption totale**

La connaissance de la valeur de l'absorption totale d'eau (**ATE**) d'un bloc est importante, car elle peut être utilisée pour avoir une idée sur la porosité d'une brique. En général,

moins est l'absorption d'eau d'un brique, meilleure est sa performance mécanique (Kerali, 2001 ; Taallah, 2014).

Etant donné que la quantité d'eau absorbée est influencée par l'état préexistant d'humidité d'un bloc, il est recommandé qu'elle soit d'abord séchée à l'étuve au poids constant.

La figure 3.3 représente la variation de l'absorption totale en fonction du dosage d'ajouts. On constate que l'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage des ajouts pour différents teneurs de **SC** et **DBR** dans les briques d'Adobe par rapport aux briques de référence **BOR**. Les valeurs de l'absorption totale sont 16.41%, 17.52% dans la gamme de 0% à 30 % de **DBR** et de **SC** respectivement. On remarque aussi, comme dans le cas de **RCS** et **RTS**, que les **BAD** donnent les meilleurs résultats par rapport des **BAS**. À titre d'exemple, pour la **BAD** à 30%, le gain de l'absorption totale est d'environ 14.93%.

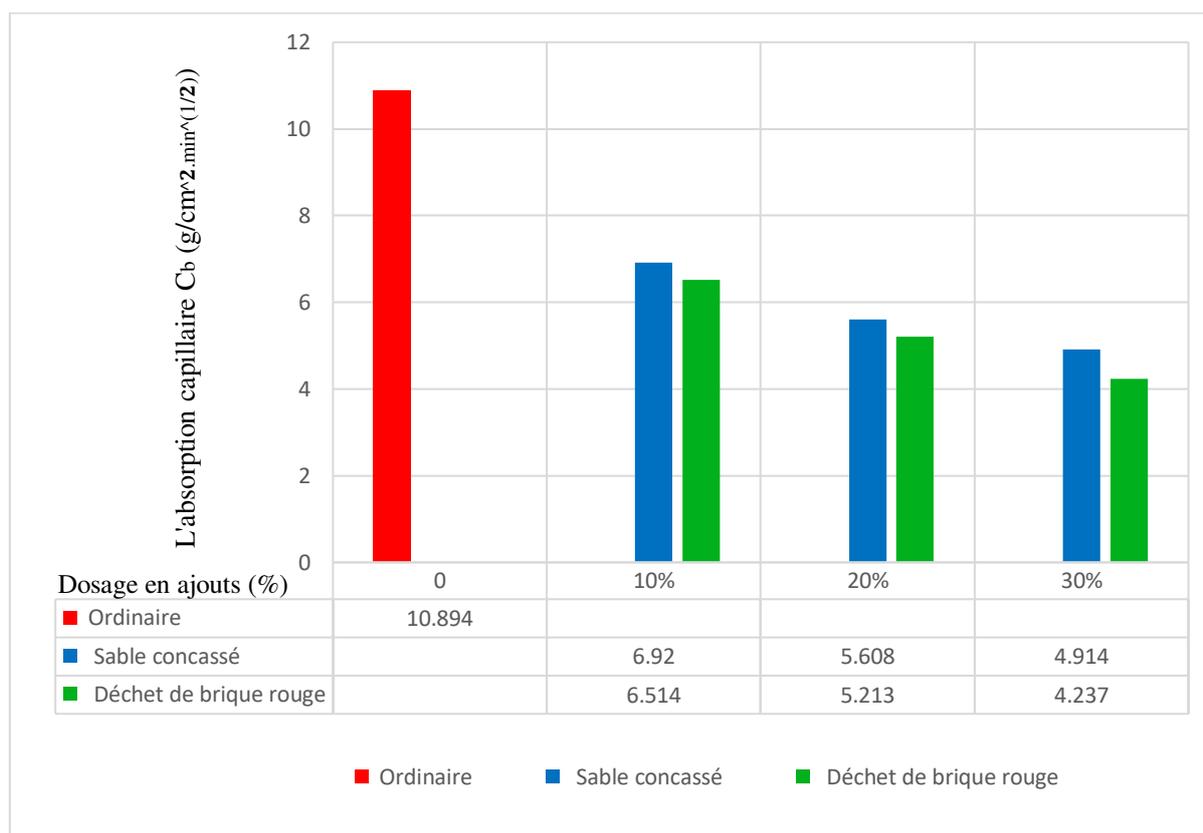


**Figure 3.3 :** Influence du dosage en **DBR** et **SC** sur l'absorption totale.

### 3.3.1.2. Absorption capillaire

Selon (Keddie, Cleghorn 1978 ; Izemmouren, 2016), presque toutes les briques peuvent absorber l'eau par capillarité. Cette propriété est clairement distincte de la facilité avec laquelle l'eau peut pénétrer dans une brique (Neville, 2000).

Les résultats de l'absorption capillaire en fonction du dosage en ajouts sont illustrés dans la figure 3.4. Après avoir ajouté le sable concassé et le déchet de brique rouge. On a remarqué que **BAD** et **BAS** ont absorbé de l'eau moins que **BOR**. La tendance de la diminution de l'absorption capillaire est en fonction de la nature et du dosage des ajouts. En effet, on remarque une diminution significative de l'absorption pour les **BAS** et **BAD**. Cette diminution est de l'ordre de 54.91% pour 30 % de **SC**. Cependant, la diminution de l'absorption est de l'ordre de 61.15% pour 30 % de **DBR**. On remarque aussi, comme dans le cas de **ATE**, que les **BAD** donnent les meilleurs résultats par rapport aux **BAS**.

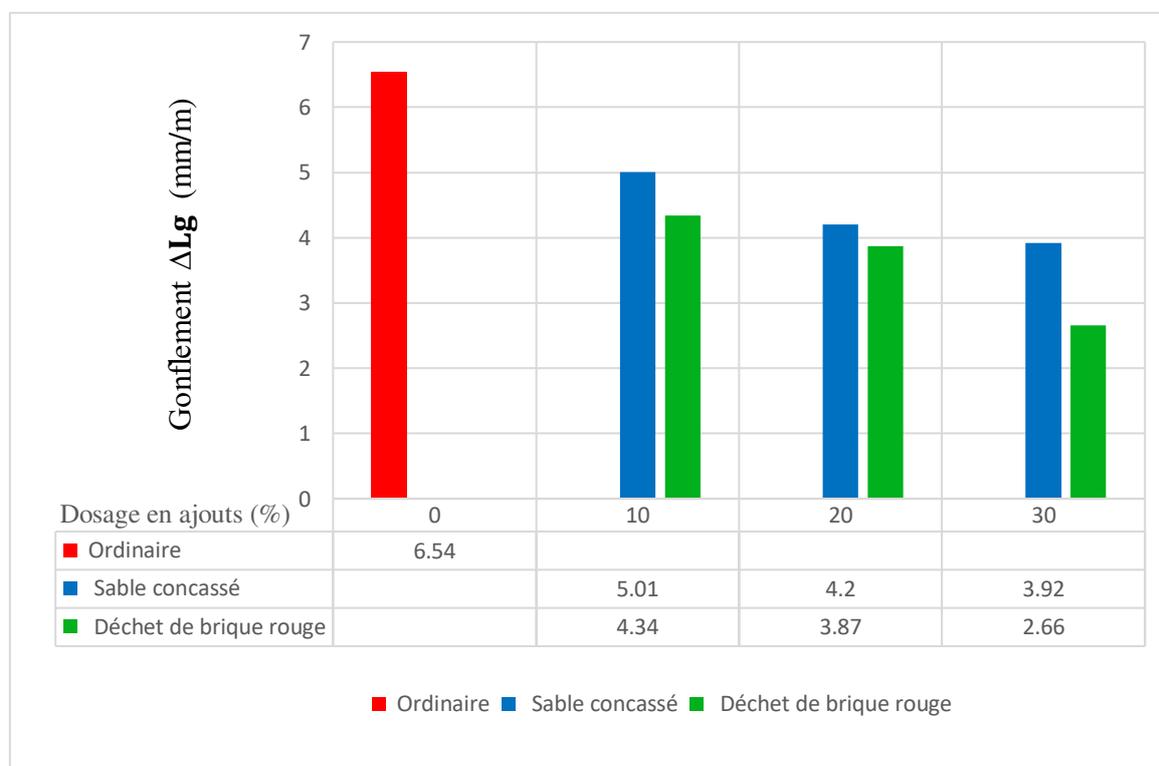


**Figure 3.4 :** Influence du dosage en **DBR** et **SC** sur l'absorption capillaire.

### 3.3.2. Gonflement par immersion

Le gonflement et le rétrécissement répétés sont susceptibles de mener progressivement à l'affaiblissement d'un tissu de bloc (directement ou indirectement). Un bloc qui contient l'eau de rétention est souvent plus faible avec une surface moins dure que quand il est sec. La présence de l'eau de rétention peut également mener à la création des conditions appropriées à la reprise et à l'accélération de l'activité chimique.

La figure 3.5 présente l'effet du dosage en ajouts sur le gonflement. D'après cette figure, on constate que le gonflement par éersion (de 96h) est diminué avec l'augmentation du dosage en ajout. L'analyse des valeurs montrent que la diminution du gonflement des briques **BAS** et **BAD** est inférieure aux briques sans ajout. En termes de pourcentage, cette diminution est de l'ordre de 40.06% pour l'ajout de 30% de **SC**. Néanmoins, la diminution du gonflement est de l'ordre de 59.32% pour 30% de **DBR**. Les valeurs les plus faibles du gonflement par rapport au **BOR** sont celles de **BAD** suivies par les valeurs de **BAS**. A titre d'exemple, à 30% de **DBR** et de **SC** et 12% de chaux, les valeurs de gonflement sont : 2.66% et 3.92% respectivement. L'incorporation des ajouts (**DBR** et **SC**) diminue significativement le gonflement.

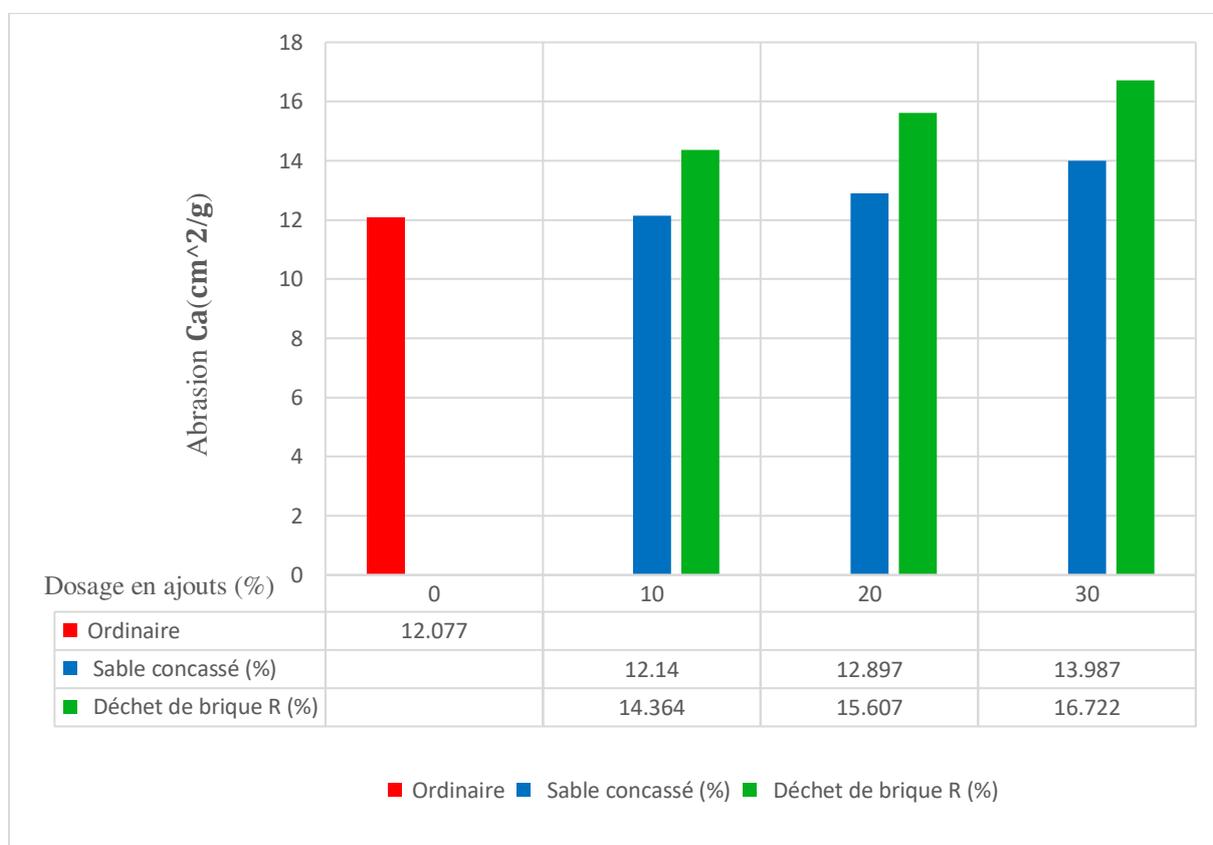


**Figure 3.5 :** Influence du dosage en **DBR** et **SC** sur le gonflement.

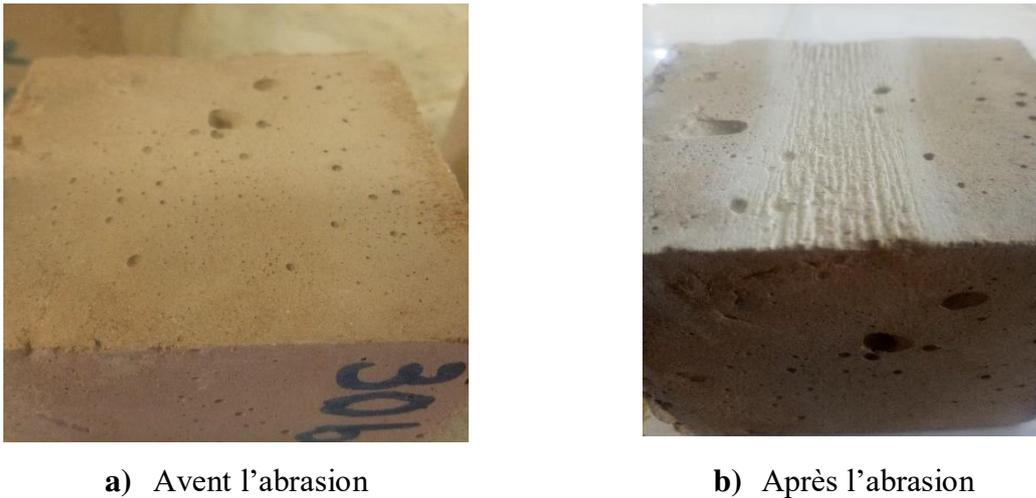
### 3.3.3. Résistance à l'abrasion

Rappelons que la détermination de la valeur de la résistance à l'abrasion des briques d'adobe utilisés en maçonnerie de parement n'est pas directement liée aux résistances mécaniques mais en général étroitement liée à la nature du sol utilisé et au taux de stabilisation du matériau (Gabouze, 2008).

L'influence du dosage en ajout sur le coefficient d'abrasion est illustrée dans la figure 3.6. L'analyse des résultats montre que le coefficient d'abrasion augmente avec l'augmentation de la teneur en ajout. Le taux d'augmentation dans la gamme (0 à 30 % d'ajout) est de l'ordre de 15.81% et 38.46 % pour l'ajout de SC et DBR respectivement. Le taux d'augmentation de l'abrasion des BAD est plus grand que pour les BAS voir (le tableau dans la figure 3.6).



**Figure 3.6 :** Influence du dosage en DBR et SC sur l'essai de l'abrasion.



**Figure 3.7 :** montre l'effet de l'ajout de 30% en déchet de brique sur la résistance à l'abrasion

### 3.4. CONCLUSION

La nécessité d'obtenir un matériau de base durable dans les constructions de brique d'Adobe était à l'origine un facteur favorisant les ouvrages ayant une durée de vie indéfiniment longue à l'exigence d'un minimum d'entretien, doit conduire à envisager un traitement qui, tout en assurant une résistance mécanique suffisante, tend à augmenter son insensibilité à l'eau.

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation des ajouts inertes (déchet de brique rouge, sable concassé), contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la durabilité des briques d'adobe confectionnés selon les différentes combinaisons avec ces ajouts.

L'étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résistances mécaniques (traction par flexion, compression à l'état sec). Augmentent en fonction de la teneur en **DBR** et **SC**. La teneur de 30% donne les meilleurs résultats pour les **BAD** et **BAS**.
- Une légère diminution de l'absorption totale avec l'ajout de **DBR** et **SC**. Pour 30% de **DBR** et **SC**, cette diminution est de l'ordre 17.52% et 16.41% respectivement.
- L'absorption capillaire diminue avec l'augmentation des **DBR** et **SC** jusqu'à 30%. Cette diminution est significative atteint 61.15% et 54.91% respectivement.

- Les briques avec ajouts de **DBR** et **SC** donnent des résultats de gonflement et coefficient d'abrasion par rapport aux briques témoins.
- Les meilleurs résultats de résistance et de durabilité obtenue par l'ajout de **DBR** suivie de l'ajout de **SC**, puis les blocs témoins.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de la brique en terre crue dans la construction, est simple et économique et de plus présente de nombreux avantages qui la rendent particulièrement intéressante pour obtenir des logements qui respectent l'environnement. Il s'agit d'un matériel utilisé depuis des milliers d'années dans de nombreux endroits dans le monde. Pendant les dernières décennies, lors de l'arrivée des matériaux de construction industrielle, la terre crue a été injustement sous-estimée et considéré archaïque. Actuellement, cette technique traditionnelle fait l'objet d'un nouvel intérêt en raison de ses magnifiques propriétés qui permettent la construction d'édifices respectueux envers l'environnement.

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

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique de la brique de terre crue est une technique ancienne, plus communément dénommé brique d'adobe, qui a une évolution moderne. Comparé à l'adobe ancien, la brique d'Adobe moderne présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

En effet, il reste beaucoup à faire pour améliorer la mauvaise image qu'offre actuellement la construction en terre et développer une technique appropriée destinée à jeter les bases d'une promotion de ce matériau et d'une future garantie de qualité bien adaptée.

Pour atteindre notre but, l'étude est scindée en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art approfondi sur l'utilisation de la brique d'Adobe, et les moyens de stabilisation, en se focalisant sur son renforcement par les minéraux d'une manière générale, notamment le sable concassé, tout en donnant plus d'importance aux déchets de brique rouge. Le chapitre 1 décrit aussi les résultats sur les mécanismes de la stabilisation sol-chaux.

Le deuxième et le troisième chapitre constituent la partie expérimentale du mémoire.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit :

- Sol local, sol de Al Alia-Biskra.
- Chaux vive de Saida.
- Sable concassé (0/3), pour la correction granulométrique.
- Déchet de brique rouge (0/2), pour la correction granulaire.

Une fois la problématique définie, le bilan des connaissances réalisé et les matières premières caractérisées, nous avons procédé à l'élaboration des différentes formulations, à la confection des briques et finalement la phase des essais.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre on a étudié l'effet de la présence des sables concassés, notamment les déchets de brique rouge, sur les propriétés physiques et mécaniques de la brique d'adobe, à savoir la résistance à la compression sèche, la résistance à la traction sèche, l'absorption totale et capillaire à l'eau, le gonflement et l'abrasion.

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

- Les résistances mécaniques (traction par flexion, compression à l'état sec). Augmentent en fonction de la teneur en **DBR** et **SC**.
- Les résistances mécaniques (traction par flexion, compression à l'état sec). Augmentent en fonction de la teneur en **DBR** et **SC**. La teneur de 30% donne les meilleurs résultats pour les **BAD** et **BAS**.
- Une légère diminution de l'absorption totale avec l'ajout de **DBR** et **SC**.
- L'absorption capillaire diminue avec l'augmentation des **DBR** et **SC** jusqu'à 30%. Cette diminution est significative atteinte 61.15% et 54.91% respectivement.
- Les meilleurs résultats de gonflement et de coefficient d'abrasion sont obtenus l'ajout de 30% de **DBR** et **SC** par rapport aux briques témoins.
- Les meilleurs résultats de résistance et de durabilité obtenue par l'ajout de **DBR** suivie de l'ajout de **SC**, puis les blocs témoins.

D'après cette étude on conclure que on peut remplacer le sable concassé par le déchet de brique rouge qui est économique par rapport au sable concassé.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AFNOR. (1996).** Association Française de Normalisation .
- Aissa Salem. (2016).** Effet de l'activation mécanique de l'argile cuite (déchets de briques) sur le comportement mécanique du mortier. Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf M'sila, 112p.
- Akpokodje EG. (1985).** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180.
- Ausroads. (1998).** Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney.
- AZZOUZ F.Z. (2006).** Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magister Université de Tlemcen 179p.
- Barkat A bderezzak. (2006).** Magister en génie civil Filière : Aménagement Hydraulique et Génie Civil.Ouargla : Université KASDI MERBAH.
- Barkat A bderezzak. (2006).** Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, Mémoire de magister en génie civil, université KASDI MERBAH-OUARGLA.
- Benaissa Mohamed. (2011).** Étude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane, 3.3-Description du phénomène de gonflement. memoire de magester, univercite Abdelhamid Ibn badis de mostganem, p138.
- Bensalem Ahmed. (2010).** Caractérisation et exploitation de l'argile de Benazzouz dans la construction routière. Memoire de magister, univercité de badji mokhtar-annaba, 136p.
- Bibi, I., Icenhower, J., Niazi, N. K., Naz, T., Shahid, M., & Bashir, S. (2016).** Clay Minerals. Environmental Materials and Waste, 543–567. doi :10.1016/b978-0-12-803837-6.00021-4
- Bund, Kantone, Furstentum liechtenstein. (2016).** Argiles, limons et stabilisation des sols. /rev 260617/0817.
- Cabane N. (2004).** 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.

**Chauquette M. (1988).** La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. Thèse de Ph.D.Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Qué. 188 p.

**Chou Ming. (1987).** Calibration of the graphite-methane buffer using the f." sensors at 2-kbar pressur. American Mineralogist, Volume 72, pages 76-81.

**de Chazelles, C.-A. (2003).** "Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue: textes latins et données archéologiques". Techniques & Culture, 41, pp. 1-27.

**Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J., (1975).** An introduction to rock-forming minerals: Longman Group Ltd., London, 528 p.

**Duchaufour P. (1997) :** Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement, Masson (Paris) ; 286p.

**Eades J. L. et Grim R.E. (1966):** A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. Highway Research Record n°139.

**Grimm. (1962).** applied clay mineralogy.

**Guettala A, Guenfoud M. (1997).** Béton de Terre Stabilisée Propriétés Physico-Mécaniques et Influence des Types d'argiles. La technique moderne.

**Guettala A. (2003).** Béton de terre stabilisée : amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p.

**HARAS NATIONAUX. (2004).** Fiche techniques génie hippique. Mai 2019.

**Houben H, et al, (1979).** Construction en terre. Équipements de production. Le CRATerre, France, N° ; 183, 265 p.

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

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

**Houben H, Rigassi V, Garnier P. (1996).** Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p.

[http://www.permaculturedesign.fr/permaculture– construction naturelle la terre crue de A à Z.](http://www.permaculturedesign.fr/permaculture– construction naturelle la terre crue de A à Z)

<http://www.ente-aix.fr/documents/135>.

[http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3\\_Classification Sols](http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3_Classification Sols).

**Ingles, O G et Metcalf, J B. (1972).** SOIL STABILIZATION PRINCIPLES AND PRACTICE, Butterworth and Company Publishers Limited 88 Kingsway, London, England, Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Vol 11, 374 p.

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

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

**Jiménez Delgado MC, Guerrero IC. (2007).** The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials vol 21; 237–251.

**Keddi J, Cleghorn W. (1978).** Brick manufacture in developing countries. Scottgish academic press ltd. Edinburg, Scotland.

**Kerali AG. (2001).** Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University,

**Le Roux A, Rivière A. (1969).** Traitement des sols argileux par la chaux. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris. (40): 59–95.

**Little DN. (1987).** Fundamentals of the stabilization of soil with lime. National Lime Association, Arlington, Virginia. Bulletin 332. 20 p.

**M. Afès G. (2000).** Stabilisation des sols gonflants : CAS D'UNE ARGILE EN PROVENANCE DE MILA (ALGERIE), Didier Bull Eng Geol Env 59, pp 75–83.

**Myriam O, Ali M. (2016).** Construire en terre crue de Guyane, Document préparatoire au séminaire formation. Lycée professionnel de Balata à Matouri.

**Neville AM. (2000).** Properties of concretes. Springer, Berlin, pp 345–350.

**NF EN12390-5. (2001).** Essai pour béton durci, partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes. AFNOR ; p 8.

**NF P 94-053. (1991).** Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. AFNOR ; p 6.

**NF P 94-056. (1996).** Analyse granulométrique des sols tamisage à sec après lavage. AFNOR ; p 15.

**NF P18-592. (1996).** Essai au bleu de méthylène. AFNOR ; p 5.

**NF P94-051. (1993).** Détermination des limites d'Atterberg–Limite de liquidité à la coupelle Limite de plasticité au rouleau. AFNOR ; 15 pages.

**NF P94-057. (1992).** Analyse granulométrique des sols-Méthode par sédimentation. AFNOR ; p 20.

**NF XP P13-901. (2001).** Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications-Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR ; p. 35.

**Nicolas Cabane. (2004).** 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 en génie de procédès.Université Jean Monnet - Saint-Etienne,

**Pedro G. (1994).** Les minéraux argileux. Masson, Paris, France, 665p.

**Rigassi V. (1995).** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne,104 p.

**Symons WG. (1999).** Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia.

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

**United Nations. (1992).**Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p.

**Vilenkina N. (1959).** Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux, Mouscou.

**Webb DJT. (1994).** Stabilised soil and the built environment. Renewable Energy, Vol. 5, No. 5-8, 1066-1080.

**Winterkorn HF. (1975).** Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp.

[www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue](http://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue).