

الجمهورية الجزائرية

الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة ابي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURES

Par : AMAR BENSABER Fatiha Chahrazed

HASSAINE Soumia Chahinez

Sujet

**ETUDE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE
DE LA BRIQUE DE TERRE COMPRESSEE BTC**

Soutenu publiquement, le 10 / 06 / 2024 , devant le jury composé de :

M. ABOU-BEKR Nabil	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme SMAIL Nadia	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BENCHOUK Assia	Professeure	Université de Tlemcen	Encadrante
M. AIT SALEM Ahmed A.	Docteur	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Remercîment

Nous remercions avant tous dieu Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la motivation pour arriver a ce stade du savoir et de présenter ce modeste travail.

Nous remercions également mes enseignants la faculté génie civil, nous tenons a exprimer nos vifs remerciements et nos profond respect à notre directeur monsieur **AIT SALEM Abdelmadjid** doctorant à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen et aussi à notre directrice madame **BENCHOUK Assia** professeure à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen qui nous fait l'honneur de diriger ce travail de recherche et pour les conseils et les corrections sans lesquels nous n'aurions pas pu fournir ce travail et l'enrichir, ni apporter les correctifs indispensables .

Nous tenons a remercié notre deux examinateurs monsieur **Nabil ABOU-BEKR**, professeur à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen examinateur et madame **Smail Nadia** professeure à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen.

Enfin, je tiens à remercier mes chers parents qui nous ont toujours toujours poussé et motivé dans nos études. Sans eux, nous n'aurions certainement pas pu étudier aussi longtemps, ainsi que ma sœur, mes frères et toute ma famille et mon binôme.

Résumé :

Les briques de terre compressée sont une option de construction respectueuse de l'environnement, économique et durable, mais elles requièrent une conception adéquate et des soins adéquats afin de garantir leur durabilité et leur efficacité à long terme.

Le but de notre étude expérimentale est d'évaluer les performances des briques de terre compressée dans des conditions hydromécaniques, et permettrait d'approfondir notre compréhension de leurs caractéristiques et de fournir des données indispensables pour leur utilisation dans le domaine de la construction, notamment en ce qui concerne leur durabilité, leur résistance et leur efficacité dans différents environnements.

La terre utilisée est un tuf de la région de Beni-Saf, qui répond aux critères de granulométrie et de plasticité requis par la norme des briques de terre comprimée.

Les substances stabilisantes employées dans cette étude comprennent la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et les grains argileux.

On a effectué une évaluation mécanique en effectuant un essai de la résistance à la compression, essai de tenue à l'eau par immersion et un essai d'abrasion.

Ensuite on a effectué un essai hydrique intitulé mesure de succion.

Enfin, nous vous proposons une analyse approfondie et contextuelle des données expérimentales, ce qui permet d'éclairer les performances hydromécaniques des briques de terre compressée et de guider les décisions futures concernant la construction durable.

Mots clés : Briques de terre compressée, durabilité, stabilisantes, résistance, hydromécanique.

ABSTRACT:

Compressed earth bricks are an environmentally-friendly, economical and sustainable building option, but they require proper design and care to ensure their long-term durability and effectiveness.

The aim of our experimental study is to evaluate the performance of compressed earth bricks under hydromechanical conditions, and would deepen our understanding of their characteristics and provide much-needed data for their use in construction, particularly with regard to their durability, strength and effectiveness in different environments.

The soil used is a tuff from the Beni-Saf region, which meets the granulometry and plasticity criteria required by the compressed earth brick standard.

The stabilizing substances used in this study include silica fume, natural pozzolan and clay grains.

A mechanical evaluation was carried out by means of a compressive strength test, an immersion water resistance test and an abrasion test.

This was followed by a hydric test entitled suction measurement.

Finally, we offer an in-depth, contextual analysis of the experimental data, which sheds light on the hydromechanical performance of compressed earth bricks and guides future decisions on sustainable construction.

Keywords: compressed earth bricks, stabilizers, durability, resistance, hydromechanics.

ملخص:

يعد الطوب الترابي المضغوط خيار بناء صديق للبيئة واقتصادي ومستدام، ولكنه يتطلب تصميماً وعناية مناسبين لضمان متانته وفعاليته على المدى الطويل.

الهدف من دراستنا التجريبية هو تقييم أداء الطوب الترابي المضغوط في ظل الظروف الهيدروميكانيكية، ومن شأنه أن يعمق فهمنا لخصائصه ويوفر البيانات التي تشتد الحاجة إليها استخدامه في البناء، خاصة فيما يتعلق بمتانته وقوته وفعاليته في بيئات مختلفة.

التربة المستخدمة هي تربة الطوف من منطقة بني صاف، والتي تفي بمعايير قياس الحبيبات واللونة المطلوبة في معيار الطوب الترابي المضغوط.

تشمل مواد التثبيت المستخدمة في هذه الدراسة دخان السيليكا واليوزولان الطبيعي وحبيبات الطين.

تم إجراء تقييم ميكانيكي من خلال إجراء اختبار قوة الضغط، واختبار الغمر بالماء واختبار التآكل.

ثم أجرينا بعد ذلك اختباراً مائياً يسمى قياس الشفط. أخيراً، نقدم تحليلاً سياقياً متعمقاً للبيانات التجريبية، ونلقي الضوء على الأداء الهيدروميكانيكي للطوب الترابي المضغوط ونوجه القرارات المستقبلية بشأن البناء المستدام.

الكلمات المفتاحية: الطوب الترابي المضغوط، المقاومة، الاستدامة، المثبتات، هيدروميكانيك

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : LA CONSTRUCTION EN TERRE

I.Introduction	1
II. Construction en terre.....	1
II.1 Historique.....	1
II.2 Les constructions en terre crue dans le monde	1
II.3 La construction en bloc de terre en Algérie	3
II.4 Différentes techniques.....	5
II.4.1 Le Pisé.....	5
II.4.2 Le torchis.....	6
II.4.3 Adobe	7
II.4.4 La bauge.....	7
II.5 Les avantages de construction en terre	8
II.5.1 Avantages-écologiques.....	8
II.6 les inconvénients	9
III. La brique de terre crue compressée (BTC).....	9
III.1 PROCESSUS DE PRODUCTION DE LA BTC	9
III.2 Les différents types de BTC	12
III.2.1 Blocs courants	12
III.2.2 Blocs accessoires.....	12
III.2.3 Blocs parement.....	12
III.3 Fabrication et pression de compactage des blocs.....	12
III.3.1 La production avec des presses manuelles	13
III.3.2 Méthodes de compression.....	13
III.3.3 Influence de l'énergie de compactage.....	14
III.3.4 Influence de la granularité du sol.....	17
III.3.5 Densification par gradation.....	17
IV. Stabilisation	18
IV.1 Objectif.....	18
IV.2 Les techniques de stabilisation	18
IV.3 Les différents types de stabilisations	21
IV.3.1 Stabilisation mécanique.....	21

IV.3.1.1	Mode de compactage	21
IV.3.1.2	Les avantages de stabilisation mécanique	21
IV.3.2	Stabilisation chimique	21
IV.3.3	Stabilisation physique.....	22
V.	La stabilisation aux liants classiques	22
V.1	La stabilisation aux liants minéraux	22
V.1.1	La stabilisation au ciment	22
V.1.2	stabilisation à la chaux	23
V.1.3	Stabilisation mixte ciment chaux	23
V.1.4	Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux	24
A.	Floculation et agglomération	24
B.	Réaction pouzzolanique	25
V.1.5	Modification des propriétés des sols traités à la chaux.....	25
V.1.5.1	Evolution de la consistance du sol.....	26
VI.	L'ajout de fibres	26
VI.1	Rôle de l'ajout de fibre	26
VI.2	Influence de la teneur en eau	26
VII.	Conclusion.....	27

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

I.	Introduction	29
II.	Matériaux utilisés.....	29
II.1	Le sol.....	29
II.2	Types de stabilisants.....	30
II.2.1	Fin argileuse	30
II.2.2	Fumée de silice.....	31
II.2.3	Pouzzolane naturel	32
III.	Caractérisation des matériaux.....	32
III.1	Caractérisation physico chimique.....	32
III.1.1	La perte au feu	32
III.1.2	Analyse thermogravimétrie (ATG) et Analyse thermique différentielle (ATD) .	33
III.1.3	Diffraction des rayons X (DRX).....	34
III.2	Caractéristiques géotechniques.....	38
III.2.1	Les limites d'Atterberg et indice de plasticité	38

III.2.2	Analyse granulométrique.....	39
III.2.3	La teneur en matière organique	40
IV.2.5	L'essai Proctor selon la norme NF 94-093.....	40
IV.2.5.1	Essai Proctor normal.....	40
IV.2.5.2	Essai de Proctor modifié.....	40
V.	Confection des éprouvettes cylindriques.....	41
V.1	Cure des échantillons	41
V.2.	Essai d'absorption par capillarité.....	42
V.3	Mesure de succion	42
VI.	Confection des briques de maçonnerie.....	43
VII.	Propriétés des briques de terre comprimées BTC.....	44
VII.1	Résistance à la compression	44
V.II.2	Tenue à l'eau par immersion.....	45
V.II.3	Abrasion par brosse métallique	46
VIII.	Conclusion	46

CHAPITRE 3 : INTERPRETATION DES RESULTATS

I.	Introduction.....	48
II.	Choix des mélanges pour la confection des briques	48
III.	Codification des mélanges.....	48
IV.	Comportement mécanique de brique de terre compressée et stabilisé.....	49
IV.1	Résistance à la compression	49
IV.1.1	Analyse des résultats.....	49
IV.1.2	Classification des résultats obtenue avec la norme XP-P-13-901	52
IV.1.3	Interprétation et récapitulatif des résultats de la résistance à la compression : ...	52
IV.1.4	Comparaison avec les études antécédentes.....	53
IV.2	Résistance à l'abrasion	55
IV.2.1	Analyse des résultats	55
IV.2.2	Classement des résultats obtenus selon la norme XP-P-13-901	57
IV.2.3	Interprétation et récapitulatif des résultats d'essai d'abrasion.....	57
IV.3	Tenue en eau par immersion.....	57
IV.3.1	Analyse de résultat.....	57
IV.3.2	Interprétation des résultats.....	59

V. Comportement hydrique de brique de terre compressée et stabilisé	60
V.1 Mesure de la succion	60
VI. Conclusion.....	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Repères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecque 2011).....	2
Tableau I.2 Les opérations de construction en terre en Algérie (Source : CNERIB, 2000).....	3
Tableau II.1 Paramètres physiques du tuf de Beni-Saf (Sebaa, 2021)	29
Tableau II.2 Résultats de l'analyse minéralogique des différents matériaux utilisés (Ait Salem, 2024).....	36
Tableau III.1 Codification des mélanges.....	48
Tableau III.2 Récapitulatif des résultats de résistance à la compression... ..	51
Tableau III.3 Classification des mélange sellons la norme XP-P-13-901... ..	51
Tableau III.4 résultats de coefficient d'abrasion obtenue	56
Tableau III.5 Résultat de l'essai de tenue à l'eau par immersion... ..	59
Tableau III.6 résultats de succion obtenue.....	61

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Timimoune au désert algérien.....	4
Figure I.2 Région de Touat.....	4
Figure I.3 Construction en pisé.....	5
Figure I.4 Mur en brique de terre crue.....	5
Figure I.5 Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon... ..	6
Figure I.6 Mur en torchis... ..	6
Figure I.7 Façonnage de la Adobe	7
Figure I.8 Mélangé sol argileux et la paille... ..	8
Figure I.9 Panneaux muraux.....	8
Figure I.10 Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).....	13
Figure I.11 Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996)	14
Figure I.12 : La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding,1993).....	15
Figure I.13 Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).....	15
Figure I.14 La relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol (USAGE, 2000).....	16
Figure I.15 Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en sable (Doat, 1979).....	17

Figure I.16 Presse manuelle.....	19
Figure I.17 Presse mécanique....	19
Figure I.18 Stabilisants chimiques avec la chaux	19
Figure I.19 Stabilisants chimiques avec le ciment.....	19
Figure 1.20 Stabilisation physique avec le mélange de fibre	19
Figure 1.21 amélioration à la fissuration	19
Figure 1.22 Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004).....	23
Figure I.23 Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (Bell, 1996)	25
Figure 1.24 Exemple de courbe Proctor... ..	26
Figure II.1 Tuf calcaire	28
Figure II.2 Fine argileuse.....	30
Figure II.3 Fumée de silice	30
Figure II.4 Pouzzolane naturel.....	31
Figure II.5 Analyse thermo gravimétrique du sol (Ait Salem, 2024)	33
Figure II.6 DRX du tuf de Béni-Saf selon (Ait salem, 2024).....	34
Figure II.7 DRX de l'argile de Boughrara (Ait Salem, 2024)	34
Figure II.8 DRX de la pouzzolane (Ait Salem, 2024)	35
Figure II.9 DRX de la fumée de silice (Ait Salem, 2024)	35
Figure II.10 L'intersection entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994 (Ait salem A, 2024).....	37
Figure II.11 Distribution granulométrique et le domaine recommandé par la norme Xp P13-901 et Houben and Guillaud, 1194 (Ait salem.A 2023).....	38
Figure II.12 Compactage dynamique OPN ; OPM pour le tuf de Béni-saf (Ait Salem, 2024).....	40
Figure.II.13principe de l'essai d'absorption capillaire	41
Figure II.14 Moule10x20x5.....	42
Figure II.15 Presse utilisé pour la confection des briques... ..	43
Figure II.16 Essai de tenue en eau par immersion.....	44
Figure II.17 Dispositif pour essai d'abrasion(a) système de guidage, (b) brosse avec poids (Ait Salem, 2024).....	45
Figure III.1 Résistance à la compression en fonction des formulations... ..	49
Figure III.2 Presse pour L'essai de compression	49
Figure III.3 Etat de brique avant l'essai de la résistance à la compression.....	50

Figure III.4 Etat de brique après l'essai de la résistance à la compression	50
Figure III.5 Comparaison entre nos résultats et les résultats d'Ait Salem.....	53
Figure III.6 Comparaison des résultats de résistance à la compression avec la littérature	54
Figure III.7 la variation de coefficient d'abrasion des formulations.....	55
Figure III.8 Etat de brique après l'essai d'abrasion	55
Figure III.9 Perte de masse après essai de tenu a l'eau par immersion pour les différents Mélanges.....	58
Figure III.10 Etat de brique après l'essai.....	69
Figure. III. 11. Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03).....	61
Figure III.12 succion en fonction de temps de séchage.....	62
Figure III.13 les échantillons cylindriques pour essai de succion.....	63
Figure III.14 Etat d'échantillon après l'essai.....	63

NOTATIONS :

BTC	:	Brique de terre comprimée
WL	:	Limite de liquidité
Wp	:	Limite de plasticité
Ip	:	Indice de plasticité
Wopt	:	Teneur en eau optimale
ρ_d max	:	la masse volumique sèche maximale
OPN	:	Optimum Proctor normal
OPM	:	Optimum Proctor modifié
Rc	:	Résistance à la compression
Cb	:	Coefficient d'absorption d'eau
Ca	:	Coefficient d'abrasion
P	:	Perte de masse (%)

INTRODUCTION GENERALE

Les données récentes de l'ONU indiquent que plus de 2 milliards de personnes à travers le monde vivent toujours dans différentes formes de bâtiments en terre. Ces constructions en terre sont réalisées à partir de matériaux à base de terre comme matière principale. En fait, c'est le principe essentiel de la construction traditionnelle. De plus, il offre de nombreux bénéfices tels que sa faible consommation d'énergie, ses performances thermiques élevées, son absorption acoustique, sa prévention des radiations et sa protection de l'environnement écologique, ce qui en fait un choix privilégié. Il s'agit d'une construction respectueuse de l'environnement.

Cependant, pour mettre en place et choisir la qualité du sol pour la construction, il est essentiel d'avoir des performances réglementaires minimales, et il est essentiel de procéder à des tests de contrôle de la qualité des matériaux.

Actuellement, les briques de terre compressée (BTC) sont un matériau de construction qui se démarque par sa conception moins polluante que les briques cuites et les parpaings du même type. Elles sont produites à l'aide d'une méthode simple qui implique de mélanger de la terre (avec des propriétés géotechniques adaptées), du liant et de l'eau, suivi d'un compactage, ce qui réduit les émissions de gaz carbonique à effet de serre dans l'atmosphère. Le sol constitue le principal composant des (BTC), qui est abondant. Ainsi, cela présente un bénéfice économique.

Cependant, ces matériaux en terre crue présentent une grande sensibilité à l'eau, soit par l'absorption de l'humidité du sol, soit par l'exposition des briques à la pluie, ces conditions entraînent la désagrégation ou l'érosion de la maçonnerie en terre crue, ce qui a un impact direct sur la longévité des bâtiments. Il est nécessaire de stabiliser les briques pour résoudre ce problème.

L'objectif de notre recherche expérimentale est de trouver la bonne formulation qui nous donne de bons résultats mécaniques pour assurer la stabilité de la structure et aussi pour assurer une bonne tenue à l'eau.

Pour atteindre notre objectif ce mémoire est divisé en trois chapitres :

- différents types de stabilisants employés dans la construction de bâtiments, en suite nous examinerons le matériau terre et son influence sur l'environnement.
- Le chapitre deux inclut un aperçu des résultats de la caractérisation géotechnique et physico-chimique du sol et des stabilisants qui sont principalement abordés. Une deuxième section aborde les résultats des diverses études de caractérisation mécanique hydrique de la terre crue en brique.
- Dans le troisième chapitre qui est réservé a notre recherche proprement dite ou nous allons présenter les différents résultats obtenus. Ces résultats mécaniques et de tenues à l'eau sont comparés avec des études antérieures réalisées au sein du laboratoire EOLE.

Enfin, on termine notre travail par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1 :

La construction en terre

I. Introduction :

Il est indéniable que la terre est le matériau naturel le plus accessible et inépuisable à l'échelle mondiale. La terre crue, qui a été utilisée par des générations entières pour la construction, est maintenant considérée comme l'un des matériaux oubliés. Cependant, la construction en terre crue présente de multiples bénéfices et peut être réalisé en utilisant diverses méthodes. D'après son nom, la terre crue désigne une construction utilisant la terre comme matériau de base, qui peut être mélangée avec du sable ou de la paille, par exemple.

La brique de terre compressée est dérivée de l'adobe, l'un des tout premiers matériaux de construction utilisés par l'homme. Elle se fabrique à partir d'argile tamisée, comprimée encore humide dans une presse mécanique. Une fois démoulée, on la met à sécher naturellement sous abri.

Cette brique est innovante et conjugue modernisme et tradition, tout en offrant des caractéristiques thermiques, acoustiques et hydriques inégalées. On l'utilise depuis les temps les plus anciens pour la construction de bâtiments, comme en témoigne l'habitat traditionnel dans de nombreux endroits de notre planète. Suite à son abandon et à son oubli avec l'émergence des matériaux de construction industriels, notamment le béton et l'acier, elle suscite désormais un regain d'intérêt tant dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. Selon Houben (1996), ce matériau, souvent critiqué en raison de sa sensibilité à l'eau et de son manque de durabilité, offre de nombreux bénéfices pour la construction de logements durables, confortables et économiques.

II. Construction en terre :

II.1 Historique :

L'homme utilise la terre, une ressource naturelle, dans la construction depuis des milliers d'années. Toutes les constructions de la grande muraille de Chine, des pyramides aztèques et de la casbah marocaine sont en terre, les ruines de Mansourah, Le fait qu'il puisse être utilisé comme matériau pour l'habitat, en utilisant peu d'énergie et en étant disponible quasi immédiatement, lui confère encore aujourd'hui un succès indéniable. Selon une estimation, environ 30 % des maisons à travers le monde sont construites à partir de terre .

II.2 Les constructions en terre crue dans le monde :

Toutefois, ce qui rend cette architecture en boue remarquable, c'est sa solidité et sa capacité à

faire face aux conditions climatiques et aux facteurs d'érosion, ainsi que sa conception technique raffinée et merveilleuse. Tableau I.1

De nos jours, ce patrimoine essentiel renait de part le monde avec de nouvelles recherches car il revêt une grande importance économique, sociale et environnementale, et va dans le sens de la promotion d'un développement durable et la préservation des ressources naturelles contre le gaspillage et la pollution.

Tableau I.1 Repères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecque 2011)

Temps	Evènement
11 000 ans	Premières traces de la construction en terre en Amérique du sud.
10 000 ans	En Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main.
8500 ans	Apparition de la brique de terre en Turquie.
8000 ans	Apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale.
5000 ans	Apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.
1860 ans	Apparition des fours à feux continus qui permettent une production plus industrielle de la brique.
1918 et 1945	Début des reconstructions suite aux conflits mondiaux et abandon de la terre crue en milieu urbain.
A partir de 1980	Redécouverte de la terre crue pour la sauvegarde du patrimoine dans un premier temps puis pour ses qualités environnementales.

II.3 La construction en bloc de terre en Algérie :

Le désert algérien est caractérisé par la construction en terre ou en brique de terre, comme le montre la figure I.1, et la région du Touat représente une grande partie de ce vaste désert, Figure I.2. La construction est basée sur de la boue, qui est perçue comme un héritage culturel matériel. En cherchant à préserver ce patrimoine, le chercheur doit simplement chercher, le faire revivre et l'exploiter pour revenir au style architectural traditionnel d'origine, le moderniser dans les zones désertiques et le mettre en valeur dans le domaine du tourisme et du développement économique.

Au cours des 50 dernières années l'Algérie a enregistré beaucoup de programmes qui ont été réalisés, Tableau I.2 nous consignons quelques opérations pilotes citées par ordre chronologique.

Tableau I.2 Les opérations de construction en terre en Algérie (Source : CNERIB, 2000)

Années de réalisations	Projets réalisés
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhliet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS.

1981	40 logements sont réalisés à Cheraga près d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC)
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion Immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.



Figure I.1 Timimoune au désert algérien



Figure I.2 Région de Touat

II.4 Différentes techniques :

Il existe plusieurs techniques de construction en terre.

. Le pisé : Le pisé est un mélange de terre, de sable ou de gravier et d'argile crue malaxés puis compactés.

. Le torchis : Le torchis est un mélange de terre argileuse fine et de paille. Il est appliqué sur une structure de pans de bois, appelés les "colombes".

. L'adobe : L'adobe est une brique en terre crue moulée.

. La bauge : La bauge est une technique de construction qui consiste à façonner des boules de terre argileuse que l'on empile directement à la main et que l'on tasse pour former un mur massif monolithique, c'est-à-dire d'une seule pièce.



Figure I.3 Construction en pisé



Figure I.4 Mur en brique de terre crue

II.4.1 Le Pisé :

Les constructions en terre battue sont construites à partir d'un sol assez humide pour s'entretenir. On mélange la terre avec de l'eau afin de créer une bouillie qui est ensuite tassée entre les volets à l'aide d'une pilonneuse manuelle ou pneumatique. La structure d'un mur construit en utilisant la technique du pisé, le coffrage utilisé est déterminé par la figure I.5. En raison du motif esthétique des strates qui se forme à partir du pilonnage, les murs en pisé sont souvent laissés tels quels. Il est possible de sculpter les murs construits dans une certaine mesure lorsque la terre est humide. La terre battue présente un faible taux de retrait, une durée de vie prolongée et une résistance par rapport aux autres méthodes.

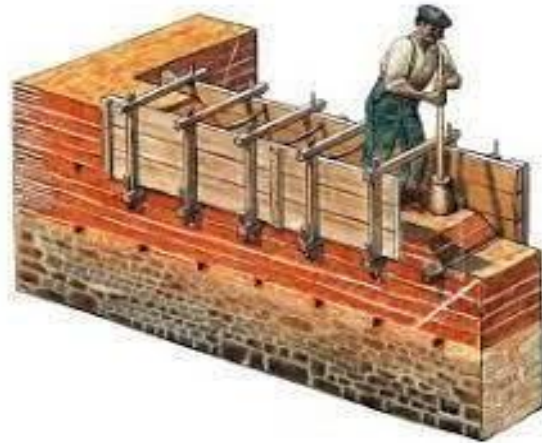


Figure I.5 Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon

II.4.2 Le torchis :

Les torchis (Wattle and Daub) sont parmi les méthodes les plus répandues pour réaliser des murs de remplissage. Il est employé depuis au moins 6 000 ans et continue d'être largement employé dans de nombreuses régions du globe. Le treillis tissé est constitué de bois et est recouvert d'un mélange de terre.

En général, il est constitué de terre humide, d'argile, de sable, d'excréments d'animaux et de paille, comme illustré dans la figure I.6

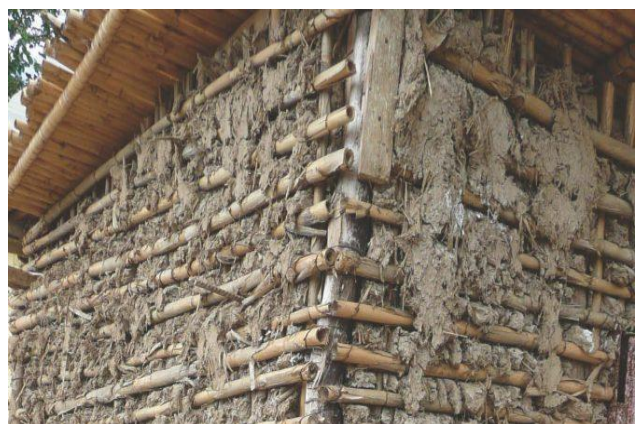


Figure I.6 Mur en torchis

II.4.3 Adobe :

Cette méthode spécifique est utilisée à travers le globe depuis des milliers d'années. L'adobe, également connu sous le nom de brique d'argile séchée au soleil, est l'un des matériaux de construction les plus anciens utilisés par l'humanité. Les adobes se composent d'une boue malléable épaisse. Fréquemment associée à de la paille et fabriquée à la main ou dans des moules en bois, comme illustré dans la figure I.7. Il est possible de les assembler aisément en utilisant le mélange d'adobe qui sert également de lien pour les briques individuelles. Les constructions en Adobe sont très résistantes et le matériau possède une grande capacité de résistance thermique. Toutefois, les constructions en adobe peuvent être altérées par un séisme si elles ne bénéficient pas d'un renforcement adéquat.



Figure I.7 Façonnage de la Adobe

II.4.4 La bauge :

Le sol argileux est mélangé à de l'eau avant d'être ajouté à de la paille, comme illustré dans la figure 1.8. La terre contribue à rassembler la paille. L'utilisation de l'argile de paille permet de préparer facilement des panneaux muraux, des revêtements de sol et des grandes briques. Il est servira de remplacement aux cloisons sèches et à l'isolation, offrant ainsi une construction légère avec des propriétés thermiques avantageuses. fig1.9.



Figure I.8 Mélangé sol argileux et la paille



Figure I.9 Panneaux muraux

II.5 Les avantages de construction en terre :

- ✓ Absorbe et restitue l'humidité
- ✓ Régule la température par inertie thermique.
- ✓ Très bon isolant phonique
- ✓ Une matière première renouvelable
- ✓ Un matériau malléable
- ✓ Régule l'humidité relative d'un espace
- ✓ Contribue au confort thermique de la maison
- ✓ Contribue à l'inertie acoustique
- ✓ Résiste au feu
- ✓ S'adapte à toute forme d'architecture

II.5.1 Avantages-écologiques :

- ✓ Utilise peu d'eau en phase de transformation.
- ✓ Est une ressource locale abondante et renouvelable.
- ✓ A des vertus thérapeutiques, soigne les affections de la peau, détruit les bactéries et les acariens

II.6 les inconvénients :

La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante : même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler.

III. La brique de terre crue compressée (BTC) :

La technique du bloc de terre comprimé (BTC) est une technique récente par rapport à l'histoire de la construction en terre. Elle a été développée dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie dans les années 50. La méthode présente une avancée technologique par rapport au bloc de terre moulée, également connu sous le nom de bloc d'adobe. Les blocs sont obtenus par compression de la terre légèrement humide dans une presse métallique plutôt que de les mouler à la main dans un cache en bois.

La BTC est très similaire en formes et en dimensions au bloc moulé à la main, plus dense, plus résistant à la compression et à l'eau. Cependant, l'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance des blocs de terre moulée est ancienne. Les premiers blocs de terre comprimée ont été fabriqués à l'aide de pilons en bois. Le processus est toujours utilisé dans le monde. Au XVIIIe siècle, les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées. Mais ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on imagina les premières presses mécaniques qui utilisaient de lourds couvercles rabattus avec force dans le moule, des presses de ce type ont même été motorisées. L'industrie de la brique cuite a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux. Les années 70 et 80 ont amené l'apparition d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée.

III.1 PROCESSUS DE PRODUCTION DE LA BTC :



1 / EXTRACTION DE LA MATIÈRE

Extraction du sol



2 / TRANSPORT DE LA MATIÈRE

La terre est acheminée jusqu'à l'unité de production.
L'idéal étant d'avoir une carrière proche du site où sera transportée la terre



3 / TAMISAGE

Le passage au tamis et/ou au broyeur sert à éliminer les granulats indésirables et à rendre la terre pulvérulente.



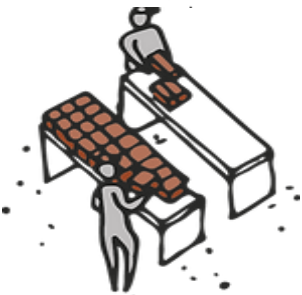
4 / MÉLANGE

La terre est malaxée au liant puis humidifiée de sorte à obtenir un mélange homogène.
Cette étape est primordiale car elle définit la qualité du matériau.



5 / PRESSAGE

Le mélange est placé dans la presse puis, les artisans actionnent celle-ci afin de compresser la terre en resserrant les grains à l'intérieur du moule.



6 / CURE ET SÈCHAGE

En cure humide (1 à 2 jours) puis en cure sèche (environ 1 semaine).



7 / CONDITIONNEMENT

Cette opération a pour but de placer les BTC produites à l'abri des intempéries (pluie, vent) et du soleil.

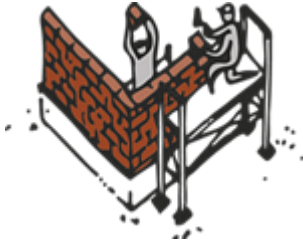
8



/ TRANSPORT DES BTC

Il s'effectue de manière minutieuse de sorte à ne pas endommager les BTC. Plus le chantier est proche, plus l'acheminement est facile.

9



/ MISE EN OEUVRE

La pose des BTC est effectuée par un maçon spécialisé mais peut également être effectuée par le producteur lui-même.

III.2 Les différents types de BTC :

La BTC se manifeste sous diverses formes en fonction de son utilisation, voici les différentes formes d'utilisation :

III.2.1 Blocs courants :

Les blocs sont employés afin de former les parties pleines des murs ou des parois. Il est possible d'avoir des blocs courants entiers ou partiels.

III.2.2 Blocs accessoires :

La forme ou la structure interne des blocs diffèrent de celles des blocs courants auxquels ils sont associés pour réaliser des points spécifiques de la maçonnerie tels que le chaînage vertical et le linteau.

En règle générale, les blocs accessoires sont utilisés comme coffrages perdus pour des éléments en béton armé, ce qui améliore les performances mécaniques de l'ensemble des blocs accessoires en béton armé.

III.2.3 Blocs parement :

Les blocs sont construits de manière à ce que les faces apparentes contribuent à la construction du mur ou de la cloison.

III.3 Fabrication et pression de compactage des blocs :

Le moule utilisé dans la technique BTC limite la taille des plus gros grains exploitables, car des cailloux ou de gros graviers empêcheraient une compression homogène du bloc. Les terres à BTC contiennent donc une proportion équilibrée de sable, limon et argile. Si la terre

est trop argileuse, elle fissure au séchage et il est recommandé d'ajouter du sable afin de limiter le retrait. Le plus souvent, il y a également addition de ciment ou de chaux afin d'augmenter la résistance mécanique et à l'eau des blocs.

III.3.1 La production avec des presses manuelles :

La première étape consiste à préparer la terre afin d'obtenir un matériau pulvérulent, humide et homogène. Cela implique diverses étapes de broyage, tamisage et malaxage, en fonction des caractéristiques physiques du matériau de départ et de l'ajout de ciment ou de chaux. Le moule de la presse est rempli d'un volume déterminé de ce mélange. Un couvercle est refermé sur le moule et la terre est comprimée manuellement à l'aide d'un long bras de levier. Le bloc est ensuite éjecté du moule, saisi à la main et empilé sur une zone de stockage de manière à laisser les faces principales en contact avec l'air afin de favoriser le séchage. Un séchage lent en atmosphère humide, appelé cure humide, est nécessaire si du ciment ou de la chaux ont été ajoutés au mélange.

III.3.2 Méthodes de compression :

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

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

Plusieurs facteurs physiques influencent la densité d'un sol de terre comprimée : la densité des particules de sol, la granularité, la quantité d'eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. Toutefois, les propriétés de la terre comprimée sont davantage élevées.

Selon Burrough (2001), la teneur en eau est plus influente que tout autre paramètre. La relation entre la teneur en eau et la densité sèche est similaire dans la plupart des sols lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de compactage spécifique (figure I.10) (USACE, 2000). Lorsque l'indice des vides d'un sol est au minimum, il atteint sa compacité maximale, ce qui correspond à une teneur en eau optimale du sol. Un sol excessivement sec entraînera de graves frottements entre les grains de sol. En revanche, un sol trop humide aura moins de

chances de se compacter car une grande partie de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas transmise aux grains de sol.

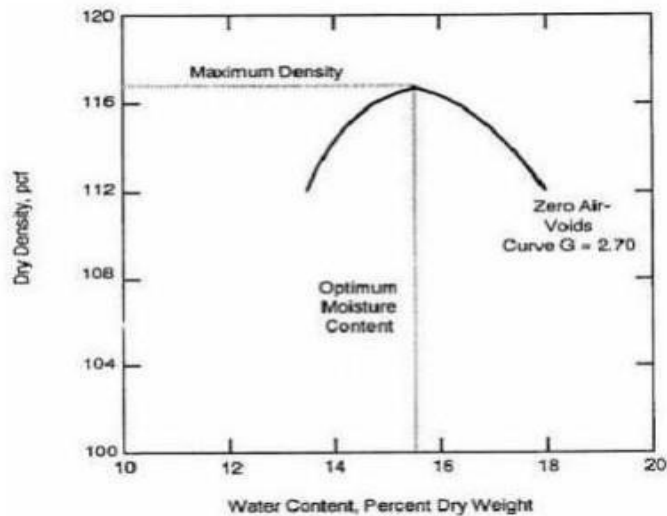


Figure I.10 Relation typique entre la teneur en eau- densité (USACE ,2000).

Selon Mesbah (1999), il a été démontré que le compactage statique est plus approprié pour les sols argileux. Par conséquent, l'expérience Proctor s'est révélée peu pratique et ne reflète pas les conditions de production des briques compressées. Effectivement, d'un autre côté, il est presque impossible de produire des échantillons à partir du moule Proctor, mais surtout, il semble qu'il n'y ait pas de corrélation entre l'« énergie Proctor » et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs (Olivier, 1986). Il est préférable de mettre l'accent sur la méthode la plus appropriée et également utilisée sur le chantier, qui consiste à déterminer directement la teneur en eau optimale avec la presse à bloc (CDE, 2000).

III.3.3 Influence de l'énergie de compactage :

Peu importe le type de sol et la technique de compactage employée, une énergie de compactage accrue réduit la teneur en eau optimale TEO et entraîne une densité sèche accrue, comme le montre la figure I.11 (Bergado, 1996 ; Winterkorn, 1975 ; USACE, 2000). Cependant, des énergies de compactage excessives peuvent engendrer des phénomènes supplémentaires qui peuvent nuire à la qualité du matériau. Selon Houben (2006), à la presse, les pressions extrêmement élevées peuvent entraîner un laminage des blocs fabriqués.

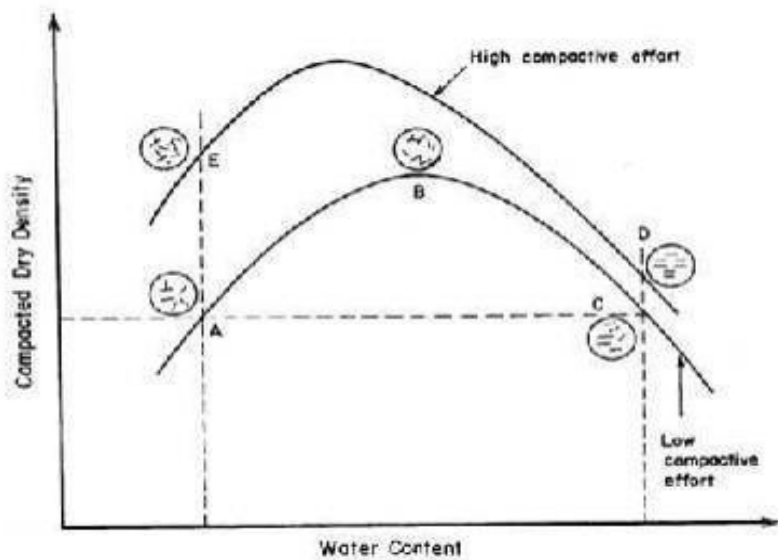


Figure I.11 Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Bergado, 1996).

Selon l'étude de Gooding (1993), il a été démontré que l'augmentation de la contrainte de compactage a un impact significatif sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisé au ciment (figure 1.12). Dans le même cadre, les études menées par Guettala et ses collègues (Guettala, 2002) démontrent que les résistances mécaniques augmentent à mesure que la contrainte de compactage augmente, jusqu'à atteindre un niveau maximal de 17.5 MPA. Cependant, en dépit de cette valeur, la résistance diminue d'environ 7% pour une contrainte de compactage de 20 MPA (Figure I.13).

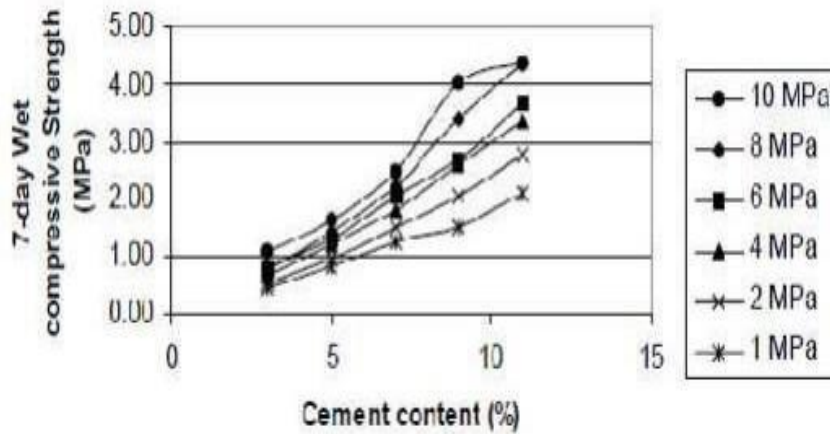


Figure I.12 La variation de la résistance en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage (Gooding, 1993).

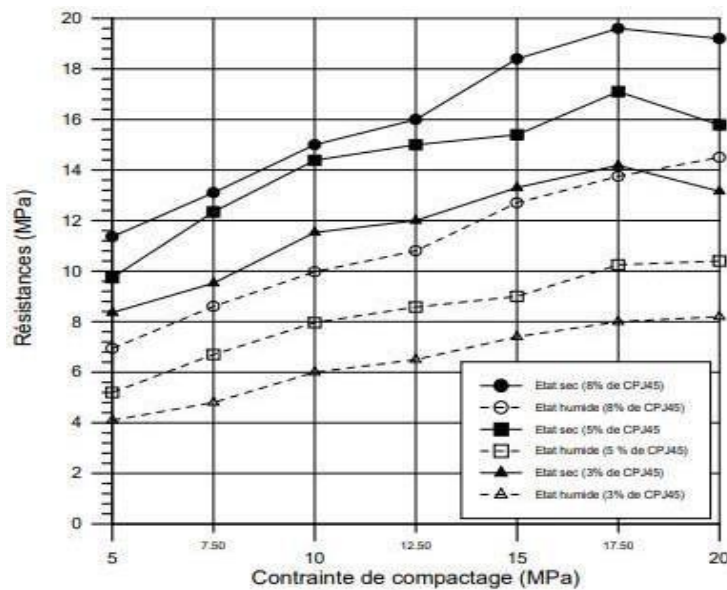


Figure I.13 Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en ciment sur les résistances mécaniques en compression (Guettala, 2002).

III.3.4 Influence de la granularité du sol :

Il est impossible d'obtenir une compacité importante en raison des granularités étroites : la courbe de compactage est aplatie avec un maximum peu marqué (figure I.14) (USAGE, 2000). Les matériaux avec des granularités étalées, qui présentent des grains de grosseurs variées, présentent cependant des courbes de compactage à maximum accentués : la compacité obtenue est améliorée. Selon USAGE (2000) et Doat (1979), il est prévu que l'association d'éléments fins et grossiers permettra d'obtenir des produits compactés plus denses que ceux obtenus avec des sols exclusivement composés d'éléments fins.

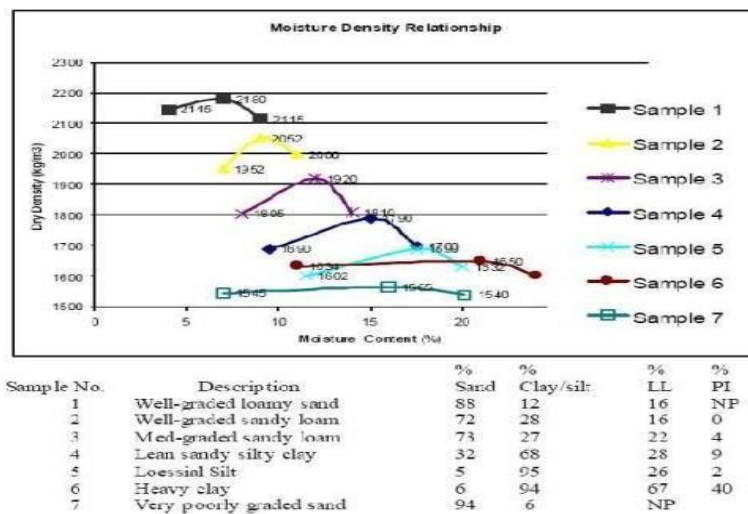


Figure I.14 La relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol (USAGE, 2000)

III.3.5 Densification par gradation :

Afin de maximiser la résistance d'une terre, à la fois aux forces mécaniques et à l'influence de l'eau, il est nécessaire de diminuer la proportion de vides et de favoriser les contacts entre les grains (Houben, 2006). Il est possible d'améliorer les terres disponibles en effectuant une correction granulaire. Il est envisageable de réduire une quantité excessive ou insuffisante de graviers, de sables ou de fines. Il est possible d'améliorer un sol trop plastique en ajoutant du sable, tandis qu'un sol trop peu plastique le sera en ajoutant des fines. Les variations de

plasticité (limites d'Atterberg) d'un mélange de sable et d'argile pour différentes proportions de sable et d'argile sont illustrées dans la figure I.15 (Doat, 1979).

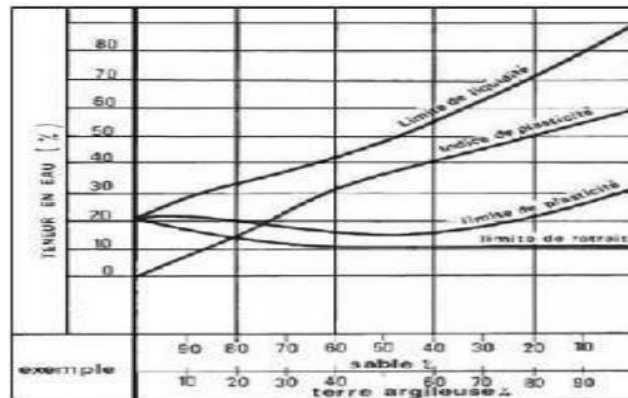


Figure I.15 Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en sable (Doat, 1979).

IV. Stabilisation :

La stabilisation englobe toutes les méthodes visant à améliorer les propriétés d'une terre afin de produire un matériau qui permet de fabriquer des blocs de terre comprimée.

IV.1 Objectif :

En maintenant la stabilité, nous modifions la texture et la structure de la terre. Il existe cinq opérations envisageables :

- La diminution du volume de vide entre les particules.
- La séparation des vides qui ne peuvent pas être effacés.
- La croissance des connexions entre les particules.
- En réduisant les vides entre les particules, on peut améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre (résistance à la compression, cohésion), en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules.
- En bouchant les vides entre les particules, on peut diminuer la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité.

IV.2 Les techniques de stabilisation :

On parle de stabilisation mécanique lorsque le matériau se compacte, ce qui entraîne des changements dans sa densité, sa résistance mécanique, sa compressibilité, sa perméabilité

et sa porosité. On peut réaliser cela en employant différentes techniques, comme le compactage manuel, illustré dans la figure 1.16, le bourrage ou le compactage mécanique, illustré dans la figure I.17.

Le processus de stabilisation chimique implique l'incorporation d'autres matériaux et produits chimiques qui altèrent les caractéristiques du sol, que ce soit par une réaction physico-chimique entre les grains et les matériaux, ou en créant une matrice qui lie ou enrobe les grains. La chaux, figI.18, le ciment, figI.19 et les cendres volantes sont les stabilisants chimiques les plus fréquemment utilisés.

L'expression "stabilisation physique" désigne la transformation de la texture des matériaux. Cela implique la combinaison contrôlée de diverses fractions de grains ou de sols naturels ainsi que la présence de fibres dans le sol, comme illustré dans la figure 1.20. Les fibres ont la capacité d'augmenter la résistance à la traction du matériau afin de le rendre plus résistant aux fissures, comme illustré dans la figure 1.21. Il convient de souligner que la stabilisation peut influencer considérablement les performances environnementales des constructions en terre.

À titre d'exemple, l'emploi du ciment peut avoir un impact sur les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, il est primordial d'analyser de manière approfondie les conséquences environnementales des diverses méthodes de stabilisation avant de prendre une décision.

Voici quelques éléments à prendre en compte lors de la sélection d'une méthode de stabilisation :

- Le prix de la stabilisation peut fluctuer en fonction du type de stabilisateur employé et de la quantité de matériau à traiter.
- Il peut être difficile de trouver facilement certains stabilisants, tels que la chaux, dans toutes les régions.
- Les résultats des différentes méthodes de stabilisation peuvent différer en fonction des caractéristiques particulières du sol. Avant de prendre une décision, il est essentiel de faire des tests sur le sol.

Comme indiqué précédemment, l'emploi de certains stabilisants peut entraîner des conséquences importantes sur l'environnement. Il est primordial d'analyser de manière

approfondie les conséquences environnementales des diverses méthodes de stabilisation avant de prendre une décision



Figure I.16 Presse manuelle



Figure I.17 Presse mécanique



Figure I.18 Stabilisants chimiques avec la chaux



Fig I.19 Stabilisants chimiques avec le ciment



Figure I.20 Stabilisation physique avec le mélange de fibre.



Figure 1.21 amélioration à la fissuration

IV.3 Les différents types de stabilisations:

Trois procédés permettent de stabiliser la terre:

IV.3.1 Stabilisation mécanique La compression de la terre entraîne des changements dans sa densité, sa résistance mécanique, sa capacité à se comprimer, sa perméabilité et sa porosité.

IV.3.1.1 Mode de compactage :

Il existe quatre méthodes de compression principales : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression dynamique par choc. compression via le processus de pétrissage. Chacune de ces techniques de compression utilise un moyen différent de produire ou d'utiliser le matériau terre. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance supérieure de cinquante pour cent par rapport à la vibrocompression et de vingt pour cent par rapport à la compression statique.

IV.3.1.2 Les avantages de stabilisation mécanique :

- Résistance augmentée : La résistance d'un matériau peut être augmentée jusqu'à 50 % grâce à la stabilisation mécanique. Cela augmente la résistance du matériau à la fissuration et à la déformation.
- Durabilité améliorée : La stabilisation mécanique peut rendre un matériau plus durable en le rendant plus résistant aux intempéries et à d'autres facteurs environnementaux.
- Amélioration de la maniabilité : la stabilisation mécanique peut rendre un matériau plus facile à travailler, réduire la quantité de déchets et augmenter l'efficacité de la construction.
- Il s'agit d'une méthode éprouvée qui a été utilisée depuis des siècles pour produire des structures robustes et durables.

IV.3.2 Stabilisation chimique : Il est possible d'incorporer d'autres matériaux que des produits chimiques dans la terre. Les liants (ciment et chaux éteinte) forment des liaisons mécaniquement solides entre les particules massives du sol, même si le matériau est ensuite exposé à l'eau.

IV.3.3 Stabilisation physique : On peut altérer les caractéristiques d'une terre en modifiant sa texture, c'est-à-dire en combinant de manière astucieuse des fractions de grains de tailles différentes.

V. La stabilisation aux liants classiques :

Il est également possible d'utiliser la stabilisation aux liants traditionnels dans les constructions en terre crue afin de renforcer les caractéristiques mécaniques et la résistance de ce matériau naturel. Une utilisation de la terre crue comme matériau de construction peut entraîner des performances médiocres en termes de résistance mécanique, de durabilité et de résistance aux intempéries. En ajoutant des liants traditionnels au mélange de terre, on peut surmonter ces contraintes en stabilisant les liants classiques.

On peut utiliser du ciment comme liant pour stabiliser les constructions en terre crue. En associant du ciment à la terre crue, on crée un matériau hybride connu sous le nom de "béton de terre" ou "terre cimentée". Les particules de terre et le ciment interagissent chimiquement pour créer des liaisons solides, ce qui renforce grandement la résistance et la durabilité de la structure.

On peut aussi utiliser la chaux comme liant pour stabiliser les constructions en terre crue. L'action physique de la chaux consiste à renforcer la cohésion et la résistance de la terre. De plus, cela diminue la sensibilité de la terre aux fluctuations d'humidité, ce qui favorise une stabilité accrue du matériau. Il est primordial de trouver le juste équilibre entre la quantité de liant ajoutée et les caractéristiques naturelles de la terre lorsqu'on utilise des liants classiques pour stabiliser les constructions en terre crue.

V.1 La stabilisation aux liants minéraux :

La stabilisation aux liants minéraux est la plus fréquemment utilisée dans les recherches. Dans une revue bibliographique sur la stabilisation de la terre (Danso et al., 2015), 90 % des articles portent sur l'utilisation de liants minéraux, dont 50 % avec du ciment. Le reste est partagé entre la chaux et d'autres additions minérales ou un mélange de plusieurs liants minéraux.

V.1.1 La stabilisation au ciment :

Le ciment améliore les qualités mécaniques de la terre, en particulier sa résistance à l'eau. Il relie les gros éléments de la terre, le sable et le gravier, de manière irréversible. Par conséquent, les résultats pour une stabilisation au le ciment est meilleur pour les sols sableuse

que pour les sols argilo-limoneux. Bien que la présence d'une quantité excessive d'argile puisse nuire à la qualité de la stabilisation, il est important que la terre contienne au moins 10 % d'argile afin de donner une cohésion à la brique après son démoulage et jusqu'à la prise du ciment. Il est interdit de cultiver des terres contenant une quantité excessive de matières organiques ou de sels. L'eau ne détériore pas ou très peu les liaisons formées. . La brique garde les caractéristiques que le compactage lui a données. (Loréa, 2014)

V.1.2 stabilisation à la chaux :

La chaux est l'un des matériaux les plus anciens que l'humanité ait utilisés.

Il existe différents types de chaux utilisés pour stabiliser les sols.

- La chaux vive est très sensible aux terres argileuses avec une forte teneur en eau. Peu de personnes l'utilisent pour la stabilisation. Le stockage et la manipulation sophistiqués limitent son utilisation.
- À son contact, la chaux vive s'échauffe brusquement car elle est très avide d'eau. Jusqu'à son utilisation, elle doit être conservée à l'abri de l'humidité. La fabrication de briques en terre crue est déconseillée car elle nécessite une quantité d'eau relativement faible et des sols sableux.
- La chaux vive est hydratée pour produire de la chaux hydratée, également appelée chaux éteinte. Elle est plus fréquemment utilisée en stabilisation car elle ne présente plus les inconvénients de stockage et de manipulation associés à la chaux vive.
- Le ciment et les chaux hydrauliques sont similaires. Ils sont rarement utilisés car il est toujours préférable d'utiliser du ciment ou de la chaux aérienne. (Loréa, 2014)

V.1.3 Stabilisation mixte ciment chaux :

Le traitement est effectué sur les sols plastiques et trop humides. Le ciment est utilisé après la chaux seule à faible teneur. Les deux liants sont complémentaires plutôt que concurrents. L'assèchement du sol trop humide est facilité par un traitement préalable à la chaux. En présence de chaux, sa floculation le rend pulvérulent et friable, ce qui le rend plus apte à être mélangé au ciment. Dès les premiers jours de traitement, les résistances mécaniques peuvent être obtenues grâce au ciment dont la cinétique d'hydratation est plus élevée que celle de la chaux. Il n'existe aucune étude qui connaisse les mécanismes qui régissent ce traitement. On

peut supposer que la pentlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment en solution remplit le même rôle de stabilisation. qu'il s'agisse de la chaux. Les hydrates du ciment dissous et de la chaux libre se combineront avec les hydrates du ciment dissous. (Oussama, 2018)

V.1.4 Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux :

Selon plusieurs études sur le traitement des sols argileux, il y a deux effets importants lors de l'ajout de chaux. un effet à court terme causé par la floculation des particules et un effet à long terme causé par la formation de composés hydratés, avec des propriétés liantes après une réaction pouzzolanique.

A. Floculation et agglomération :

La densité de la charge électrique superficielle des particules argileuses est modifiée par l'échange cationique. La formation de ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ explique ce phénomène. entre les feuilles de feuilles d'argile. Les interactions électrostatiques déstructurent les feuilles et créent une structure plutôt sphérique (figure 1.23). La texture et la consistance de l'argile sont modifiées par cette floculation-agglomération. (Cabane 2014).

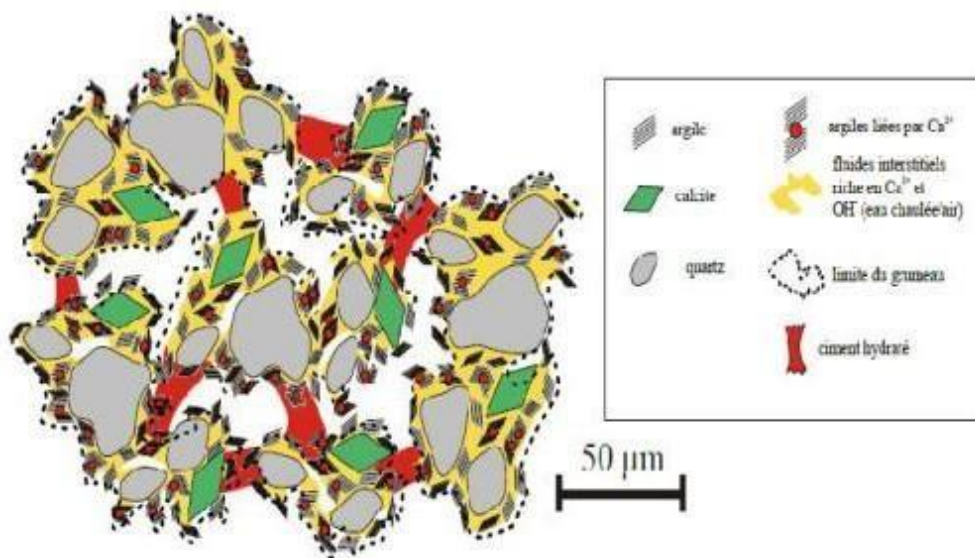


Figure I.22 Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004)

B. Réaction pouzzolanique :

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et des anions OH^-) augmente le pH de la solution en calcium. Les argiles sont attaquées et libèrent de l'alumine et de la silice dans un milieu basique et saturé en cation de calcium. En présence d'eau et d'hydroxydes de la chaux, ils réagissent avec le calcium pour former des aluminates de calcium hydratés (CAH), des silicates de calcium hydratés (CSH) et des silicates de calcium hydratés (CASH). Suite à l'hydratation des silicates de calcium (C3S, C2S) et des aluminates de calcium (C3A, C4AF), ces composés hydratés se trouvent fréquemment dans les ciments. Ces réactions sont connues sous le nom de réactions pouzzolaniques. La saturation initiale du sol en chaux les conditionne. Eades et Grim (1966) ont découvert qu'un faible dosage de chaux, appelé "Point de fixation de la chaux" (PFC), était nécessaire pour déclencher les réactions pouzzolaniques. Selon la norme ASTM D6276-99a, le dosage en chaux PFC correspond à une valeur de pH de 12,4 pour le mélange sol-chaux.

V.1.5 Modification des propriétés des sols traités à la chaux :

V.1.5.1 Evolution de la consistance du sol :

La floculation des argiles est rapidement provoquée par l'ajout de chaux. La consistance augmente en conséquence de cette action, ce qui peut entraîner une augmentation de la limite de plasticité avec ou sans augmentation de la limite de liquidité. Le domaine de plasticité se déplace vers des teneurs en eau plus élevées en raison de cette modification. La nature des minéraux argileux du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux ont un impact sur le décalage de l'indice de plasticité.

Bell (1996) a étudié la plasticité lors du traitement à la chaux de trois types de sols : le quartz et deux types de sols argileux, lesquels étaient principalement constitués de kaolinite et de montmorillonite (figure 1.23). Il a conclu que la limite de plasticité de l'argile traitée à la chaux est influencée par sa minéralogie argileuse. La limite de plasticité de la montmorillonite augmente considérablement, la kaolinite diminue et le quartz ne change pas beaucoup

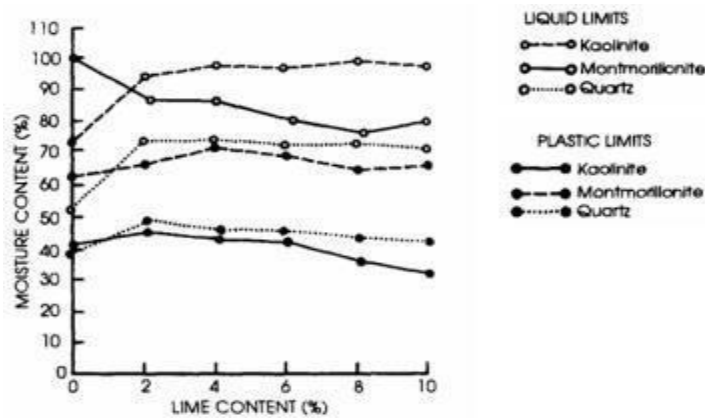


Figure I. 23 Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (Bell, 1996)

VI. L'ajout de fibres :

La fibre est fréquemment utilisée dans les méthodes traditionnelles de construction en terre. Il s'agit principalement d'ajouter de la paille aux terres qui ont été travaillées par pétrissage, puis de les appliquer sur des clayonnages en bois ou de les mouler sous forme de blocs de terre séchés au soleil. Cette technique est utilisée depuis des millénaires dans de nombreuses régions du monde. (Ghania, 2019)

VI.1 Rôle de l'ajout de fibre :

La diminution, voire l'élimination, des fissures de retrait le séchage est accéléré par le drainage de l'humidité vers l'extérieur du matériau, amélioration du matériau, Augmentation de la résistance à la traction, ce qui est sans doute le meilleur avantage.

Ainsi, la terre stabilisée avec des fibres présente une très bonne résistance à la fissuration et à la propagation des fissures car elle s'oppose au clivage lorsque la contrainte augmente.

Des résultats probants sont déjà obtenus avec un dosage à 4% en volume. (Ghania, 2019)

VI.2 Influence de la teneur en eau :

Le compactage des matériaux à base de terre est fortement influencé par la teneur en eau. Lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de compactage spécifique, presque tous les sols agissent de manière similaire à la teneur en eau et à la densité sèche. Un sol trop sec rend les grains et le compactage est inefficace. Cependant, un sol trop humide ne produit pas une

densité suffisante après compactage (Figure 1.24), car l'eau amortit une grande partie de l'énergie de compactage et ne la communique pas aux grains.

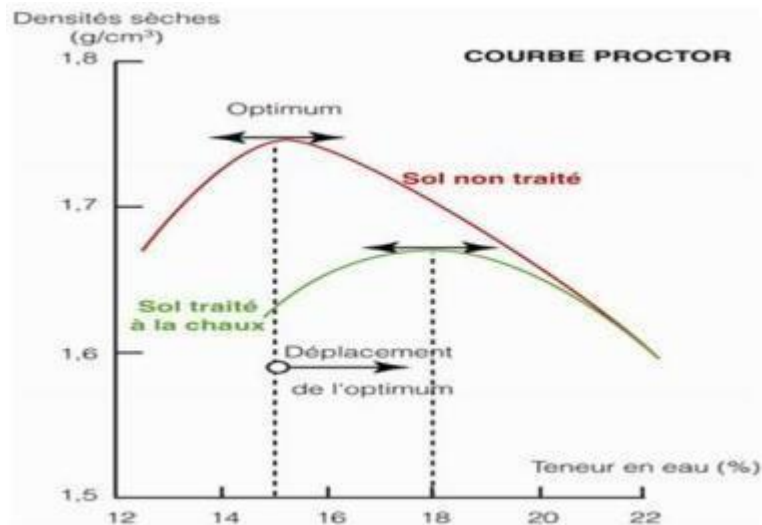


Figure I.24 Exemple de courbe Proctor

VII. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté construction en terre. L'histoire et les méthodes utilisées, les avantages et les inconvénients des constructions en terre. Il est évident que l'énergie de compactage et la teneur en eau du moulage ont un impact sur les caractéristiques mécaniques des briques de terre comprimée. De plus, il est observé que de nombreuses études se concentrent sur l'utilisation du ciment et de la chaux comme stabilisant des briques de terre comprimée, ce qui entraîne souvent une amélioration de la résistance mécanique et de l'insensibilité à l'eau. Cependant, il existe moins d'études sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle et de la fumée de silice comme stabilisant des BTC, bien qu'ils soient une source efficace pour favoriser la réaction pouzzolanique.

Chapitre 02 :

Matériaux et méthodes expérimentales

I. Introduction :

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des matériaux utilisés pour fabriquer des briques de terre comprimée doivent être connues afin de prédire la qualité des BTC en fonction de leur utilisation.

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont présentées en premier lieu dans ce chapitre, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu, nous décrivons les différentes techniques expérimentales utilisées pour étudier la durabilité et la résistance mécanique des BTC.

II. Matériaux utilisés :

II.1 Le sol :

Le matériau utilisé dans cette étude provient de la région de Beni Saf, située dans le nord-ouest de l'Algérie. Cette région est bien connue pour ses sols calcaires (tuf). Seules les particules de sol passant au travers d'un tamis de 5 mm ont été utilisées pour déterminer la distribution de la taille des particules (figure II.1). Le tuf utilisé se compose de gravier (12 %), de sable (48 %), de limon (21 %) et d'argile (19 %). Ce matériau était caractérisé par un faible indice de plasticité de 17 % et une limite de liquidité égale à 37 %.



Figure II.1 Tuf calcaire

Les principaux paramètres physiques du sol étudié sont résumés dans le tableau 1. Selon la classification USCS, le tuf de Beni-Saf peut être classé comme sable argileux (CS).

Tableau II.1 Paramètres physiques du tuf de Beni-Saf (Sebaa, 2021)

Paramètres	Valeurs
Gravier	12%
Sable	48%
Limon	21%
Argile	19%
Limite de liquide	37%
Densité spécifique	2,74
Teneur en carbonate de calcium	85%
Activité	0,9

- La pouzzolane naturelle qui issue de la même région que le sol.
 - La fumée de silice qui est vendue sous le nom de Siltek Powder par le groupe Hasnaoui « TEKNA CHEM».
 - Les argiles fines présentes dans la région de Boughrara (wilaya de Tlemcen).

II.2 Types de stabilisants :

II.2.1 Fin argileuse :

L'argile employée est issue de la région de Boughrara (à 25 km de la frontière entre l'Algérie et le Maroc). Au sein de l'équipe « sols non saturés et couplages » du laboratoire EOLE, nous avons effectué de nombreuses études sur le comportement de ce matériau.

Selon (Benchouk, 2014), cette argile a été employée dans la construction du noyau du barrage de Boughrara de Tlemcen. Selon les études physico-chimiques, ce sol se présente comme une argile extrêmement plastique, peu organique, avec une limite de liquidité de 56% (Derfouf et al. 2012).

Dans cette étude, la fraction employée est celle qui est inférieure à 80µm



Figure II.2 Fine argileuse

II.2.2 Fumée de silice :

La fumée de silice également appelée microsilice ou fumée de silice cohésive ou fumée de silice condensée est un sous-produit de la métallurgie composé de particules très fines (de l'ordre de 0,001 mm ou 1 µm), présentant une très forte teneur en silice amorphe. La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques rapides. Elle améliore la qualité et la durabilité du béton. Elle permet de combler les micro-vides.

La composition chimique de la fumée de silice est 85~96% de SiO₂, et la majorité est de la silice amorphe, qui est un très bon matériau de cendres volcaniques. la teneur en carbone ne dépasse pas 2%, et la perte de brûlure est d'environ 1.5% à 3%, la densité de la fumée de silice est de 2.20-2.30.



Figure II.3 Fumée de silice

II.2.3 Pouzzolane naturel :

On utilise une pouzzolane naturelle provenant de Béni-Saf. nous avons tout d'abord effectué son étuvage à 105°C pour éliminer toute éventuelle présence de résidus.

nous l'avons broyé avant de passer au tamisage.

On récupère et on utilise le tamisât de 0,08 mm en remplacement du ciment à des proportions et à des échéances variées.



Figure II.4 Pouzzolane naturel

III. Caractérisation des matériaux :

III.1 Caractérisation physico chimique :

Les principaux résultats de la caractérisation physico-chimique du matériau étudié sont présentés ci-dessous.

III.1.1 La teneur en eau naturel du sol:

On évalue la quantité d'eau en se basant sur la norme NF P94-050. Notre sol contient une quantité d'eau naturelle de $\omega=2,95\%$.

III.1.2 La perte au feu:

La diminution du poids d'un échantillon après avoir été calciné à 1000°C, exprimée en pourcentage, est connue sous le nom de perte au feu (PF). Lors du chauffage, il y a différents processus de déshydratation des minéraux, entraînant une perte d'eau d'hydratation et de matière organique.

La détérioration du sol à 1000°C s'élève à 4,3%.

III.1.3 Analyse thermogravimétrie (ATG) et Analyse thermique différentielle (ATD) :

Les modifications des caractéristiques physico-chimiques peuvent être causées par le traitement thermique, comme le changement de phase, l'altération structurale, la décomposition et les variations de volume.

On peut observer ces variations en fonction de la température grâce à l'analyse thermique. Les deux essais suivants peuvent être utilisés pour effectuer l'analyse thermique :

- Analyse de la différence thermique ATD.
- Vérification thermogravimétrique ATG.

La méthode analytique qualitative et quantitative appelée ATD repose sur l'analyse des événements thermiques qui se produisent habituellement dans un matériau chauffé ou refroidi. L'utilisation de l'ATD en combinaison avec une analyse par diffraction des rayons X permet d'évaluer la composition minéralogique de la matière. Les phénomènes thermiques se produisent lorsque de la chaleur est générée (réaction exothermique) ou absorbée (réaction endothermique) lors des divers processus chimiques et des changements minéralogiques qui se déroulent, tels que lors de la combustion d'un minéral argileux (Nana, 2004).

On peut utiliser l'ATG afin de surveiller les changements de masse d'un échantillon après un traitement thermique. De même que la manière dont la masse de ses composants varie pendant un cycle thermique.

Le laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (LCSCO) de l'université de Tlemcen effectue l'essai en utilisant l'appareil SDT Q600. Il évalue en même temps l'ATD et l'ATG de 20°C à 1250°C.

En examinant les conclusions de l'ATG et de l'ATD (Figure II.5), il est possible de conclure :

- La teneur en quartz est faible en raison de l'absence du pic endothermique de la transition allotropique du quartz, qui se produit à une température de 400°C.
- Le taux de calcite dans notre sol est élevé à 748°C.

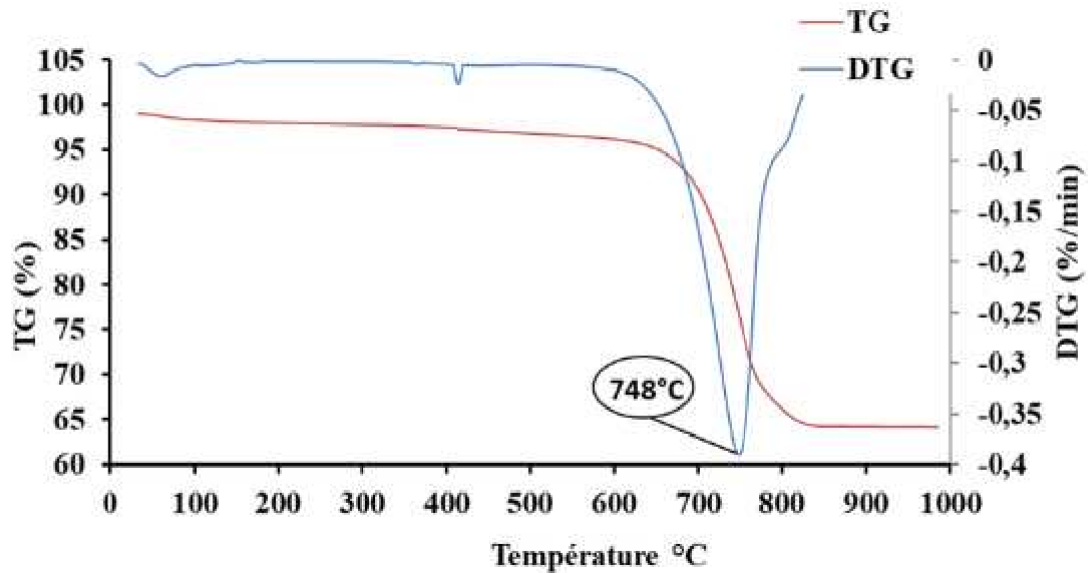


Figure II.5 Analyse thermo gravimétrique du sol (Ait Salem, 2024)

III.1.4 Diffraction des rayons X (DRX) :

La diffractométrie aux rayons X a été utilisée pour déterminer la composition minéralogique des différents composants. Il s'agit d'une méthode couramment employée dans la recherche sur les matériaux pour identifier les espèces minérales cristallines présentes dans les poudres. Le schéma aux rayons X, qui ressemble à une empreinte digitale, permet d'identifier chaque cristallin solide. Cette méthode peut être employée afin de distinguer divers types d'argiles. Ci-dessous, vous trouverez les diffractogrammes des divers matériaux étudiés.

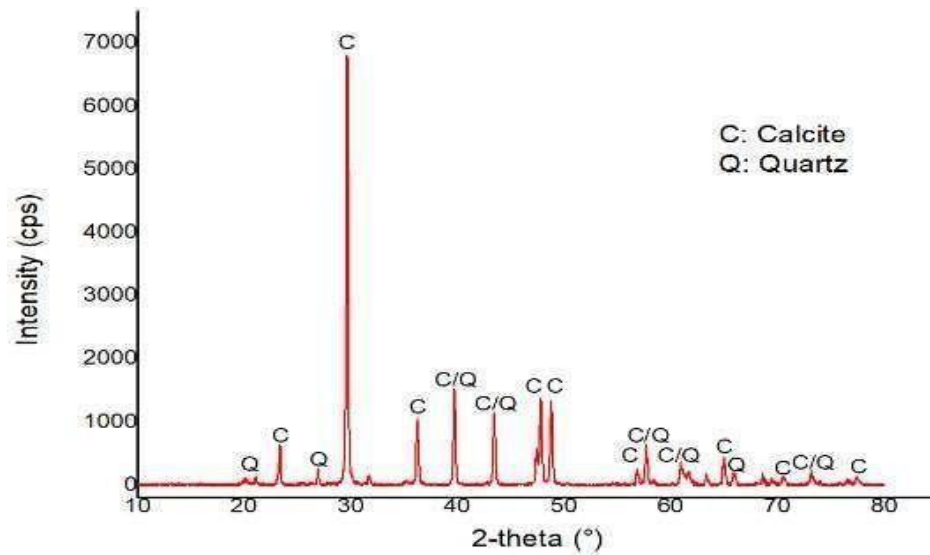


Figure II.6 DRX du tuf de Béni-Saf selon (Ait salem, 2024)

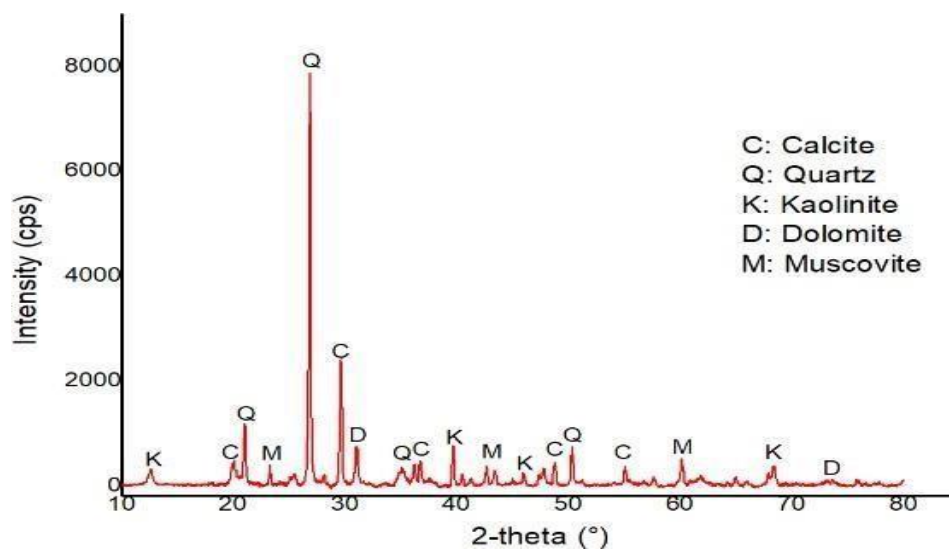


Figure II.7 DRX de l'argile de Boughrara (Ait Salem, 2024)

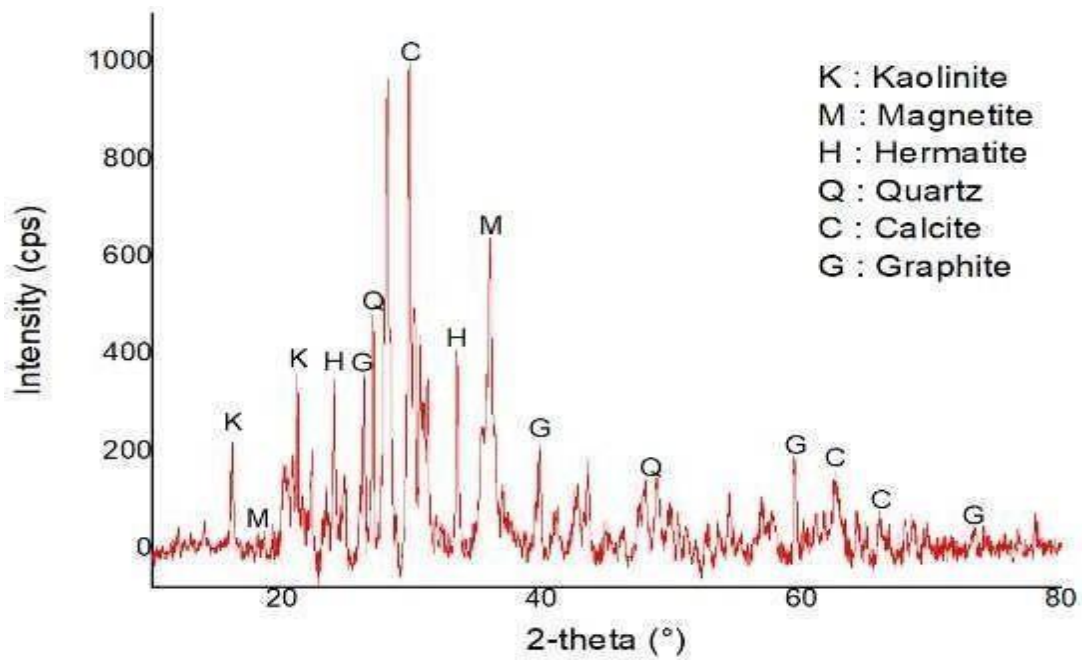


Figure II.8 DRX de la pouzzolane (Ait Salem, 2024)

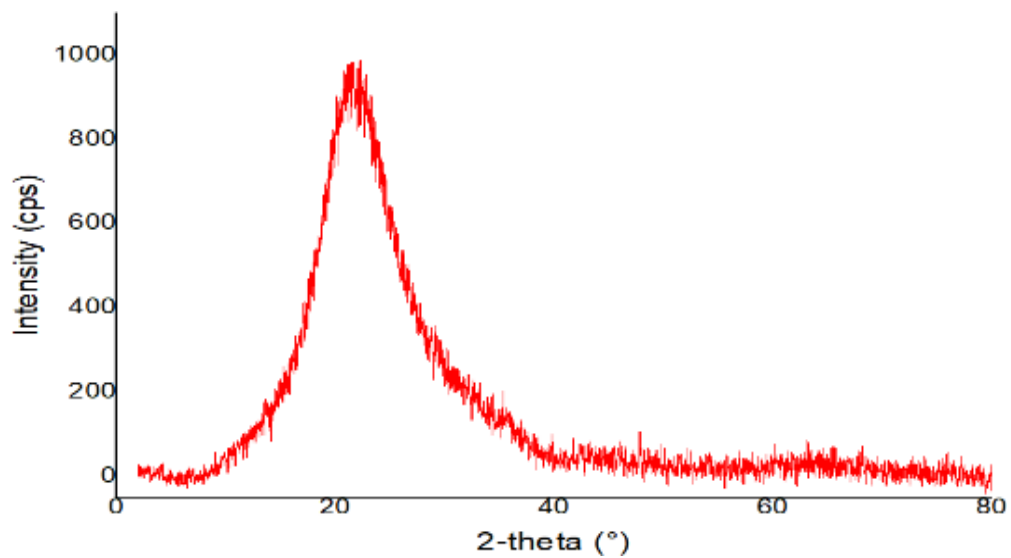


Figure II.9 DRX de la fumée de silice (Ait Salem, 2024)

D'après les résultats des différents DRX effectués on a déduit la composition minéralogique de nos échantillons (cf. Tableau II.2)

Tableau II.2 Résultats de l'analyse minéralogique des différents matériaux utilisés (Ait Salem, 2024)

Composition minéralogique (%)	Tuf de Béni-Saf	Pouzzolane Naturel	Argile de Boughrara	Fumée de silice
Quartz	52,4	16,4	31	SiO ₂ Amorph
Calcite	47,6	25	14,7	
Hematite	-	9,6	-	
Magnetite	-	17	-	
Kaolinite	-	25	13,1	
Graphite 2H	-	7	-	
Muscovite	-	-	33,3	
Dolomite	-	-	7,9	

En examinant le tableau de la composition minéralogique, on peut tirer les observations suivantes (Ait Salem, 2024) :

- Le tuf de Béni-saf est composé de quartz et de calcite dans des proportions pratiquement égales.
- La pouzzolane naturelle est essentiellement composée de quartz, d'hermatite, de magnétite, de kaolinite et de graphite 2H, avec une teneur de calcite de 25%.
- Le quartz, la calcite, la kaolinite, la muscovite et la dolomite sont présents dans l'argile de Boughrara.
- • La fumée de silice est considérée comme un SiO₂ amorphe car elle n'a pas de structure cristalline.

III.2 Caractéristiques géotechniques :

III.2.1 Les limites d'Atterberg et indice de plasticité :

Les résultats des essais de limite de liquidité et de plasticité de notre sol sont les suivants:

Le Tuf de Béni-saf a une WL de 37% et une Ip de 17,5%.

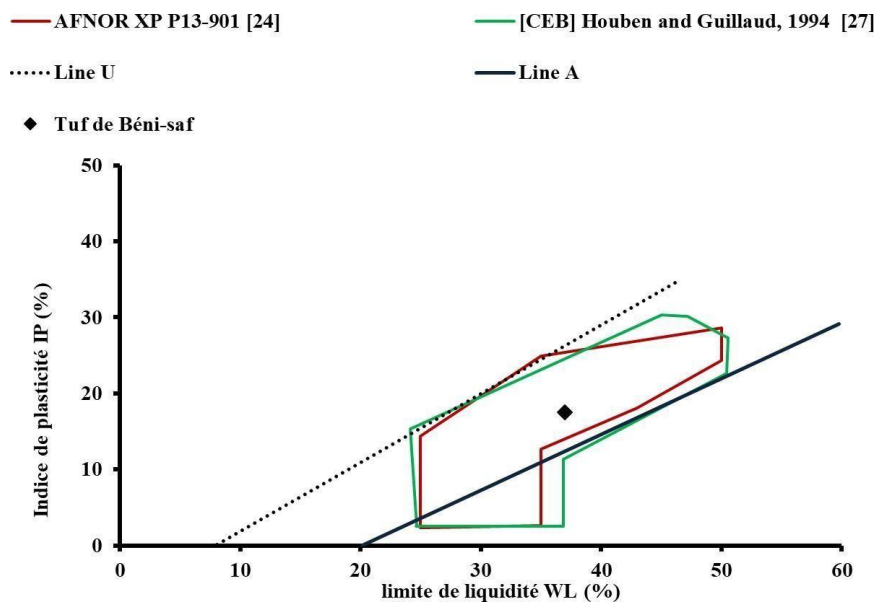


Figure II.10 L'intersection entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994 (Ait salem 2024)

Selon les résultats de l'analyse granulométrique et du fuseau de plasticité, notre matériau peut être employé pour la production de briques de terre comprimée. En respectant les directives de la norme Afnor XP P13-901.

III.2.2 Analyse granulométrique :

Il est crucial de connaître la granulométrie du sol afin de déterminer sa nature.

Les analyses granulométriques sont effectuées en utilisant le tamisage et la sédimentométrie, en respectant les normes NF P18-560 et NF P94-057 respectivement. Le tamisage est employé pour les grains ayant un diamètre supérieur à 80 μm . Dans le cas des grains les plus petits, on utilise la sédimentométrie.

La sédimentométrie consiste en la mise en place d'une suspension de sol au fond d'une éprouvette remplie d'eau. Les granules sont plus fins à mesure que leur dépôt se fait lentement (loi de Stokes). On peut déterminer la proportion de grains de chaque diamètre en mesurant la densité de la suspension à différents moments.

Le fuseau granulométrique proposé par la norme (AFNOR XP P13-901) et celui de Houben et Guillaud (1994) est parfaitement intégré à la courbe granulométrique de notre sol, ainsi qu'à la correction granulaire par les différents pourcentages d'argile, comme le montrent la figure II.11.

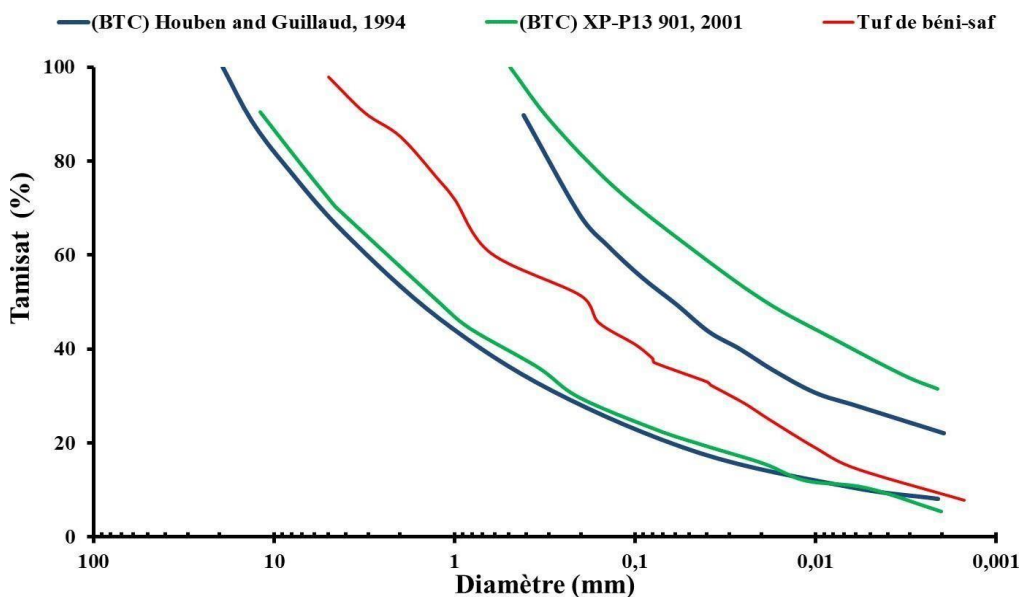


Figure II.11 Distribution granulométrique et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1194 (Ait salem.A 2024)

III.2.3 La teneur en matière organique :

La calcination à 550°C est utilisée pour mesurer la teneur en matière organique. L'essai consiste à introduire un échantillon dans un creuset et à le calciner à 550°C pendant 24 heures conformément au protocole de laboratoire. La matière organique est mesurée sur un échantillon de sol broyé jusqu'à une granulométrie inférieure à 80 µm. Avant sa calcination, la prise d'essai est placée pendant 24 heures dans une étuve à 60 ° C. Le matériel requis pour effectuer cet essai est composé de : un broyeur en agate, de bacs, d'un tamis à mailles de 80 µm, d'un creuset, d'une étuve, d'un four réglé à 550°C et d'une balance.

Pour le sol de Béni-Saf il contient peu de matière organique elle est de l'ordre de 1,7%. Donc c'est un sol faiblement organique selon la classification LCPC.

III.2.4 Essai Proctor normal:

La teneur en eau optimale (w_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_d \max$) sont déterminées pour les caractéristiques de compactage d'un sol. L'essai Proctor normal consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. On calcule la masse volumique sèche du matériau pour chacune des valeurs de teneur en eau étudiées et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

III.2.5 Essai de Proctor modifié :

Les conditions de compactage sur chantier peuvent être reproduites au laboratoire grâce à cet essai normalisé (NF P 94-093). Il est généralement effectué selon deux modes de compactage d'intensité différents : l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée) et l'essai Proctor modifié (à énergie plus intense), qui a été choisi pour mener cette investigation. Si la teneur en eau de l'échantillon est modifiée et que la variation de ρ_d en fonction de w (%), on obtient une courbe en cloche appelée "optimum Proctor".

La figure II.12 présente les résultats de l'essai de compactage dynamique Proctor normal et Proctor modifié. Les caractéristiques aux optimums sont déterminées :

- Proctor normal, $w_{optimal} = 15\%$; $\gamma_{dmax} = 17,93 \text{ KN/m}^3$; $S_{roptimum} = 79\%$.
- Proctor Modifié, $w_{optimal} = 13\%$; $\gamma_{dmax} = 19,87 \text{ KN/m}^3$; $S_{roptimum} = 83\%$.

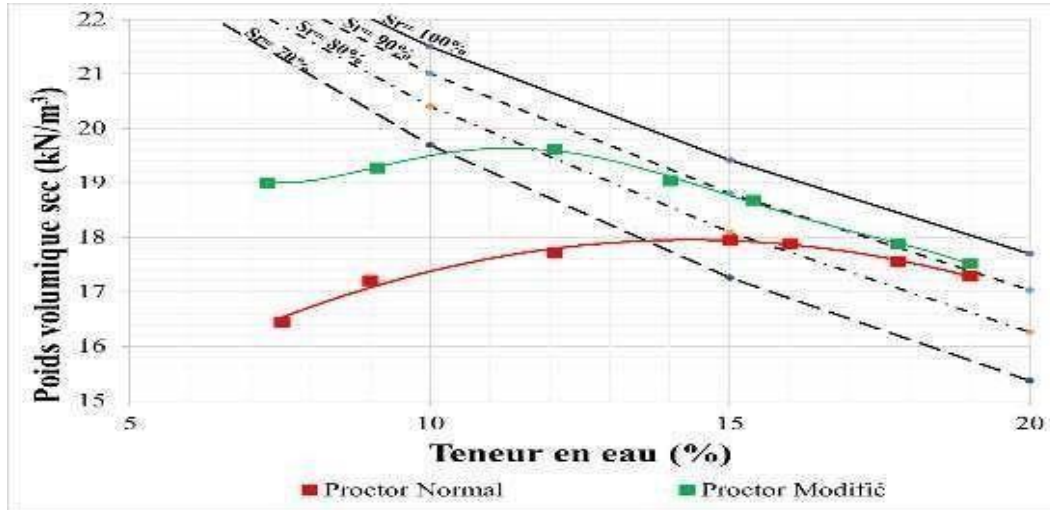


Figure II.12 Compactage dynamique OPN ; OPM pour le tuf de Béni-saf (Ait Salem, 2023)

IV. Confection des éprouvettes cylindriques

Le même processus de fabrication du BTC (mélange, compactage, démoulage) a été utilisé pour créer les spécimens d'essai (H=10 cm et ϕ =5 cm).

L'approche expérimentale suivante a été suivie pour créer les spécimens :

- Sol coupé à une épaisseur de 5 mm
- Sol séché dans un four pendant 24 heures
- Mélange avec la bonne teneur en eau
- Ajout du pourcentage de stabilisateur et mélange du mélange
- Compactage à une contrainte de 4MPa dans le moule cylindrique.

IV.1 Cure des échantillons

Pour le cas des blocs prismatique le type de cure adopté est celui qui a été utilisé par (Ait salem.A 2024) il consiste a conservé les brique après compactage dans un film en plastique et les mettre dans une étuve à 40°C jusqu'à stabilisation de leurs masse.

Pour les cas des échantillons cylindrique confectioné pour l'essai de mesure de la succion par papier filtre les échantillons sont soigneusement démoulés et placés à l'extérieur. La température ambiante du laboratoire est de 20°C \pm 2°C et l'humidité relative de 50% \pm 5%.

Ceci afin d'éviter que les éprouvettes ne se dessèchent trop rapidement.

L'impact du temps de séchage sur le développement des propriétés mécaniques a été étudié par une série d'essais de résistance à la compression réalisés 7, 14, 21 et 28 jours après le durcissement.

V.2. Essai d'absorption par capillarité :

L'essai détaillé de la norme expérimentale NF XP 13-901 mesure l'absorption d'eau par capillarité. La brique est immergée partiellement à une profondeur de 5mm. Le coefficient d'absorption d'eau C_b est le taux d'absorption après un temps spécifique. (OURADA, 2016)

Selon la formule : $C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}}$

- C_b : Coefficient d'absorption capillaire ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{S}^{-1/2}$)
- M_h - M_d : est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai
- S : surface de la face immergée, en centimètres carrés ;
- t : est la durée d'immersion du bloc en minutes.

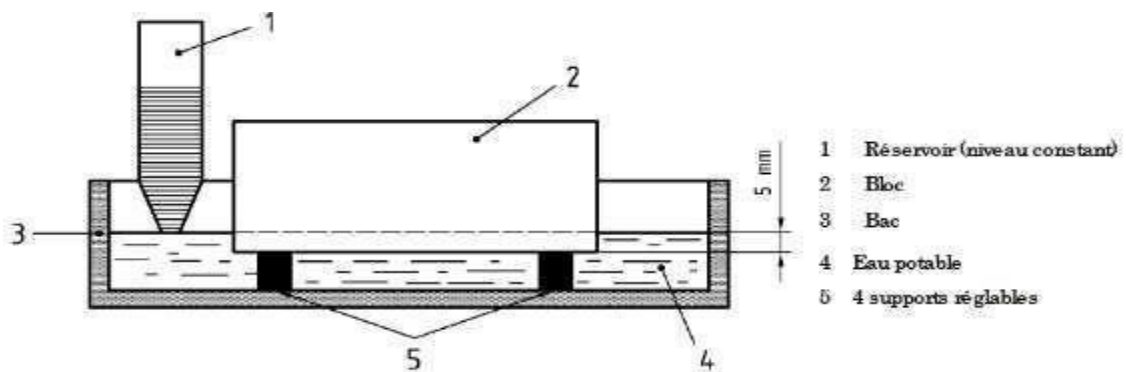


Figure.II.13 principe de l'essai d'absorption capillaire

V.3 Mesure de succion :

On a calculé les valeurs de succion lors du compactage en utilisant la méthode du papier filtre conformément à la norme ASTM D 5298-10.

Afin de calculer la succion d'un échantillon de sol, les étapes suivantes sont suivies :

- Le papier filtre est placé à l'intérieur de l'échantillon pendant le processus de compactage. Par la suite, cette éprouvette est paraffinée et laissée pendant quelques Jours jusqu'à ce que la teneur en eau du sol soit équilibrée avec celle du papier .
- Une fois que l'échantillon a été laissé pendant quelques jours (4 à 7 jours), le papier filtre placé à l'intérieur de l'éprouvette est récupéré et sa teneur en eau est mesurée .
- On obtient la concentration en eau en utilisant la courbe d'étalonnage succion-teneur en eau du papier filtre conformément à la norme ASTM D5298-10 (voir figure III.11). L'équation (2.1) et (2.2) sont utilisées pour calculer le papier filtre de type Whatman No. 42.

La valeur de la succion est calculée en fonction de la teneur en eau du papier filtre :

$$W_f < 45\% : S = 5.327 - 0.0779.W_f \quad (2.1)$$

$$W_f > 45\% : S = 2.412 - 0.0135.W_f \quad (2.2)$$

V. Confection des briques de maçonnerie :

Nous avons créé deux types d'échantillons pour notre étude :

- Cylindriques (H=10 cm et $\alpha=5$ cm) : les comportements mécanique, thermique et thermique du tuf brut et du tuf stabilisé ont été étudiés.
- Taille prismatique (20 cm x 10 cm x 5 cm) : Les blocs d'argile brute et stabilisée ont été choisis en fonction du comportement thermique et de la résistance mécanique des compositions d'échantillons cylindriques qui ont donné les meilleurs résultats. Une presse hydraulique de 30 tonnes (fig. II.15) dans un moule amovible (fig. II.14) créé par un tourneur a été utilisée au laboratoire pour créer ces briques.



Figure II.14 Moule 10x20x5



Figure II.15 Presse utilisé pour la confection des briques

VI. Propriétés des briques de terre comprimées BTC :

Pour le contrôle de la qualité, la fabrication de BTC doit respecter les normes de traçabilité, l'assurance qualité. Pour ce faire, elle doit subir de multiples tests de caractérisation. Voici une présentation de ces tests :

VI.1 Résistance à la compression :

Le BTC doit avoir une résistance minimale à la compression à sec d'au moins 2MPa, selon la norme NF XP P13-901.

Ce type de caractérisation mécanique est le plus souvent utilisé dans le secteur de la construction ; cependant, les conditions d'essai rendent souvent impossible l'évaluation précise du comportement mécanique des matériaux terrestres. Nous avons découvert dans la littérature plusieurs lignes directrices pour la réalisation d'essais mécaniques. Le rapport suivant détaille ces suggestions :

Pour que l'échantillon soit considéré comme homogène, il doit être suffisamment grand, uniforme. Pour ce faire, les dimensions de l'échantillon doivent être au moins cinq fois plus grandes que les plus grosses particules. Si la taille de l'échantillon est trop petite, la densité

diffère de celle trouvée dans des échantillons de taille adéquate, ce qui rend la mesure extrêmement sensible aux hétérogénéités des matériaux (Collet, 2004).

La forme influe sur la mise en œuvre qui, à son tour, influe sur la qualité du matériau.

Les résistances observées sont inférieures à celles des cylindres de même allongement, ce qui peut s'expliquer par le fait que le compactage est moins efficace aux angles de la terre comprimée (Maniatidis, 2008).

VI.2 Tenue à l'eau par immersion :

L'objectif de cet essai est de déterminer la perte d'une brique en contact avec l'eau. La nouvelle norme NF XP P13-901 de 2022 est le protocole expérimental utilisé. Dans cette version actualisée de la norme, cette section de tenue à l'eau par immersion a été ajoutée pour la première fois.

Les principales étapes de l'essai sont les suivantes :

- Pour activer les réactions chimiques, enveloppez les échantillons de 20 cm x 10 cm x 5 cm dans du film plastique.
- Etuver les briques jusqu'à ce qu'elles atteignent une masse constante à 105°C.
- Les BTC sont suspendus verticalement après leur étuvage et leur mise à température ambiante. Ils sont plongés dans 10 cm d'eau.



Figure II.16 Essai de tenue en eau par immersion

VI.3 Abrasion par brosse métallique :

Cela nécessite l'utilisation normalisée d'une brosse métallique (NF XP P13-901). Le test consiste à brosser la surface du bloc une fois par seconde pendant 60 allers-retours, soit un aller-retour toutes les secondes, en utilisant seulement 3 kg de pression verticale.

Notre laboratoire EOLE ne disposant pas de cet équipement normalisé, (figure II.17).



Figure II.17 Dispositif pour essai d'abrasion

(a) système de guidage, (b) brosse avec poids (Ait Salem, 2023)

VII. Conclusion :

Ce chapitre présente les différents essais d'identification des différents constituants utilisés principalement dans cette recherche. En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet de bien comprendre leur comportement lors de la production des briques (façonnage, séchage). Après avoir effectué tous les tests de caractérisation sur le tuf de béni-saf, il a été constaté qu'il est adapté à la fabrication des BTC en raison de sa granulométrie et de sa plasticité conformes à la norme XP P13-901. Un récapitulatif de l'ensemble des essais réalisés dans le cadre général de recherches sur la BTC effectuées dans le laboratoire Eole.

Chapitre 3 :

Interprétation des résultats

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons les paramètres clés à prendre en compte dans l'interprétation des résultats. Nous analyserons également l'impact de facteurs tels que la composition du matériau, la technique de fabrication, et les conditions environnementales sur les propriétés hydromécaniques des briques.

Les caractéristiques mécaniques, hydriques de notre matériau compacté statiquement et stabilisé avec trois types de stabilisant : la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et les fines argileuses, seront exposées dans ce chapitre.

Dans la section mécanique, nous examinons l'impact de l'ajout des trois stabilisants sur l'évolution de la résistance à la compression, le coefficient d'abrasion et la perte de masse sera présentés dans la partie mécanique. De plus, une étude a été réalisée sur la résistance à la compression en fonction de type de mélange. Les résultats de la mesure de succion avec les différents ajouts seront présentés dans la section hydrique.

II. Choix des mélanges pour la confection des briques

Au sein du laboratoire EOLE et plus précisément l'équipe de recherche Sols Non Saturés et Couplage, plusieurs études ont été mené sur la stabilisation du tuf de béni-saf en utilisant différents stabilisant tel que l'étude de Sbaa (2021), et Mekaideche (2021) et Ait Salem (2024).

En se basant sur les différents résultats obtenus, de nouvelles études sont menées sur l'optimisation des formulations afin de minimiser le nombre des expérimentations d'où diminution de quantité consommé du tuf. Ceci en utilisant la méthode des plans d'expérience. Il s'agit d'un ensemble de tests réalisés par un logiciel de statistique qui a pour but de nous corrélérer la composition idéale suivant les paramètres introduits.

Les formulations utilisées dans la partie expérimentale de ce mémoire sont celles qui ont été trouvées par la méthode des plans d'expérience en se basant sur les résultats expérimentaux de la thèse de Ait Salem (2024). Dans ses travaux, Ait Salem a utilisé trois stabilisants : l'argile, la pouzzolane et la fumée de silice.

III. Codification des mélanges :

Afin de faciliter la lecture des tableaux et des graphes en barre nous avons donné un code pour

chaque mélange, le tableau III.1 représente le code de chaque formulation avec les différents pourcentage des constituant.

Tableau III.1 : Codification des mélanges

Mélanges	Tuf (%)	Argile (%)	Pouzzolane (%)	Fumée de silice (%)	Eau (%)
T.30AR.10PZ	60	30	10	-	15
T.30AR.10FS	60	30	-	10	15
T.8AR.3PZ.3FS	86	8	3	3	15
T.6AR.6PZ.6FS	86	6	6	6	15
T.15AR.5FS	80	15	-	5	15
T.18AR.7FS	75	18	-	7	15

IV. Comportement mécanique de brique de terre compressée et stabilisé :

La caractérisation mécanique des échantillons stabilisés sera abordée dans cette partie.

IV.1 Résistance à la compression :

IV.1.1 Analyse des résultats :

La figure III.1 représente la variation de la résistance à la compression pour chaque type de mélange de brique de terre compressée. On remarque :

- La valeur la plus faible de résistance à la compression ($RC=3,43$ MPA) été pour le mélange (T.15AR.5FS) composée de 80% tuf, 15% argile, 5% fumée de silice et 15% eau.
- Le mélange (T.30AR.10FS) et le mélange (T.8AR.3P.3FS) ont montré la plus grande valeur de résistance à la compression ($RC=4.68$ MPA).

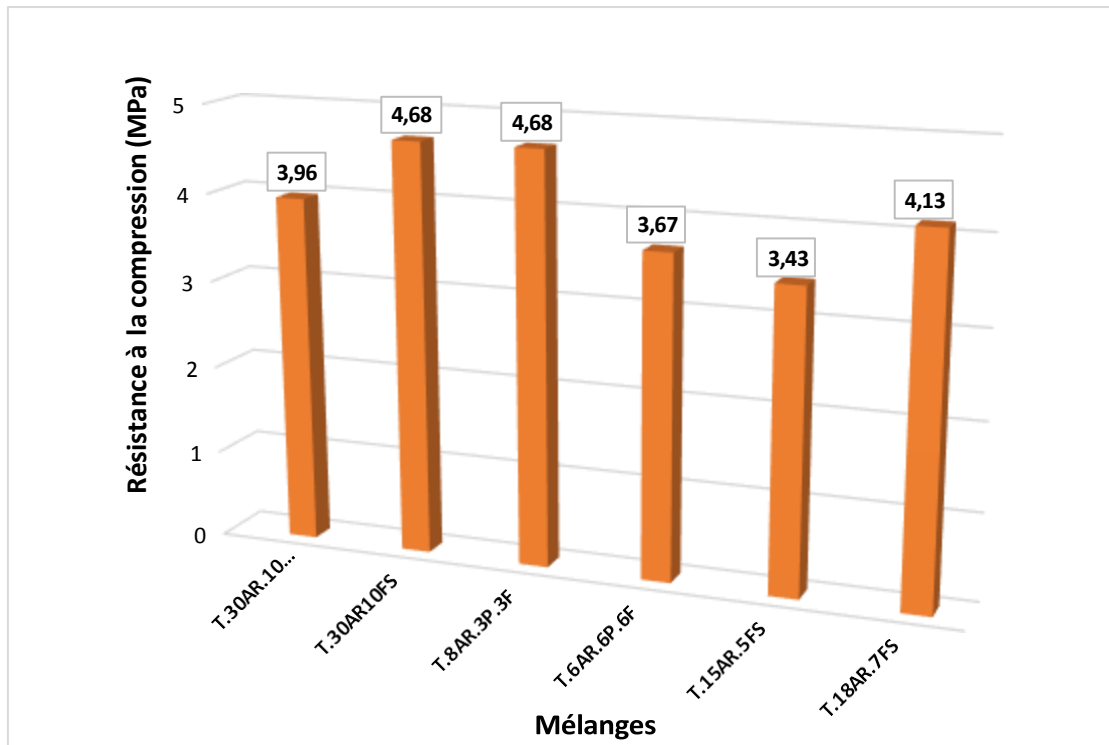


Figure III.1 Résistance à la compression en fonction des formulations



Figure III.2 Presse pour L'essai de compression



Figure III.3 Etat de brique avant l'essai de la résistance à la compression



Figure III.4 Etat de brique après l'essai de la résistance à la compression

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

Le tableau III.2 donne une récapitulation des résultats de résistance à la compression pour les différents mélanges

Les figures III.2 à III.4 montrent les étapes de l'essai de la compression des briques.

Tableau III.2 Récapitulatif des résultats de résistance à la compression

Mélanges	S (m2)	F (KN)	R(MPA)
T.30AR.10PZ	0.01	39.6	3.96
T.30AR.10FS	0.01	46.8	4.68
T.8AR.3PZ.3FS	0.01	46.8	4.68
T.6AR.6PZ.6FS	0.01	36.7	3.67
T.15AR.5FS	0.01	27.4	2.4
T.18AR.7FS	0.01	17.4	1.74

IV.1.2 Classification des résultats obtenue avec la norme XP-P-13-901 :

La classification des briques à partir de leurs résistances à la compression sellons la norme XP-P-13-901 est donnée dans le tableau III.3, où on remarque des mélanges sont classés dans la classe de résistance RC3 et RC4.

Tableau III.3 Classification des mélange sellons la norme XP-P-13-901

Mélanges	RC (MPa)	Minimum XP-P-13-901 (MPa)	Classe de résistance XP-P-13-901
T.30AR.10PZ	3.96	≥ 3	RC3
T.30AR.10FS	4.68	≥ 4	RC4
T.8AR.3PZ.3FS	4.68	≥ 4	RC4
T.6AR.6PZ.6FS	3.67	≥ 3	RC3
T.15AR.5FS	3.43	≥ 3	RC3
T.18AR.7FS	4,13	≥ 4	RC4

IV.1.3 Interprétation et récapitulatif des résultats de la résistance à la compression :

D'après nos résultats de l'essai de la résistance à la compression nous concluons que :

- Les formulations T.30AR.10FS et T.8AR.3P.3FS indique une meilleure qualité et une meilleure capacité à supporter des charges donc une meilleure résistance à la compression. Une résistance moyenne élevée dans ces deux formulations indique une brique plus solide et durable et fiable par rapport les autres.
- L'ajout de différentes quantités de stabilisants a entraîné une hausse de la résistance à la compression.
- La valeur de résistance à la compression minimale de nos résultats est 3.43MPA, d'après la norme l'ensemble des résultats est supérieur à 2MPA, cela signifié que Ces briques sont généralement plus résistantes et peuvent supporter des charges plus importantes sans se déformer ou se rompre par rapport aux briques dont la résistance est inférieure à 2MPA.

IV.1.4 Comparaison avec les études antécédente :

La figure III.5 présente une comparaison avec les résultats de résistance à la compression obtenue par Ait Salem (2024) qui à étudier la stabilisation du tuf par un seul ajout (tuf+ fumée de silice, tuf+ pouzzolane et tuf+ argile). On remarque que :

- les résultats Obtenus à partir de nos formulations T.30AR.10FS et T.8AR.3P.3F sont proches aux résultats obtenus pour l'échantillon non stabilisé ainsi que l'échantillon stabilisé avec 10% de pouzzolane TM et TM.10PZ. par contre ,
- les échantillons stabilisé avec la fumée de silice TM.10FS et l'argile T.30AR.10FS ont montré des valeurs de résistance à la compression importante.

A partir de là on peut dire que la combinaison de plusieurs stabilisant à fait diminuer la résistance à la compression surtout en présence de pouzzolane avec l'argile ou on remarque une faible résistance à la compression.

ceci est aussi trouver dans l'étude de Harichan. K (2012) ou-il à trouver que la pouzzolane naturelle ne peut pas être utilisé seul pour la stabilisation des sols argileux, par contre la combinaison pouzzolane naturel-chaux à montrer de très bons résultats.

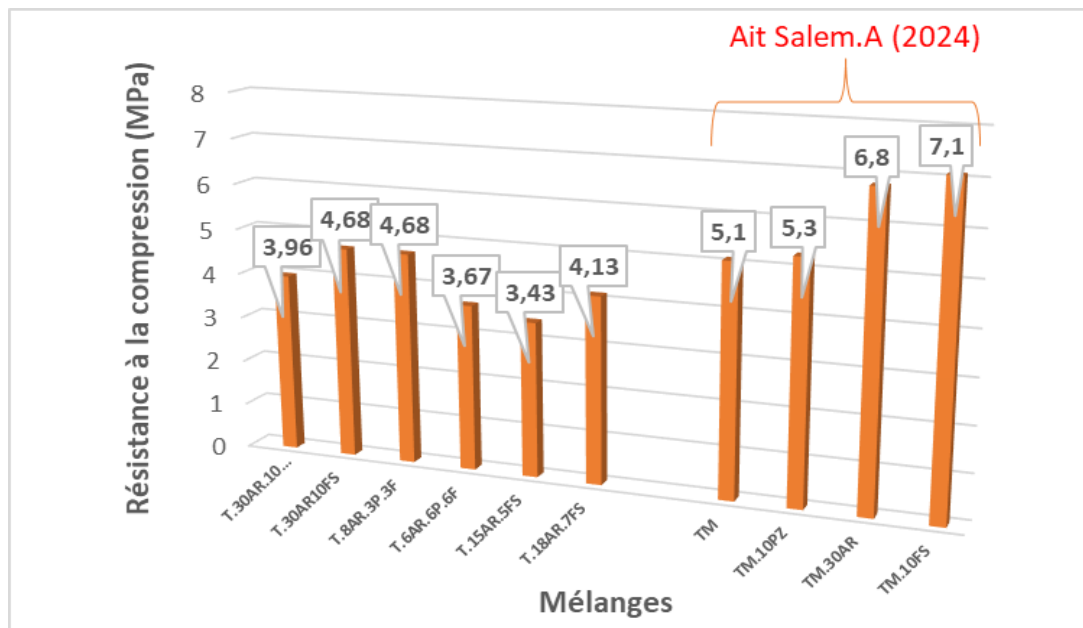


Figure III.5 Comparaison entre nos résultats et les résultats d'Ait Salem

La figure III.6 présente une comparaison avec les données de résistance à la compression obtenues par d'autres études. Comme on peut l'observer, tous les résultats des briques sont extrêmement similaires à ceux d'autres chercheurs, comme Bogas et al. (2019), qui ont découvert qu'une brique stabilisée avec du ciment avait une résistance à la compression de 5,4 MPa.

La valeur de résistance maximale acquise par Sore et al. (2018) en utilisant une combinaison de stabilisation entre le ciment et un géopolymère était de 8,95 MPa. Pour une brique brute non stabilisée, Ben Mansour et al. (2016) ont découvert une valeur maximale de résistance à la compression d'environ 4,2 MPa.

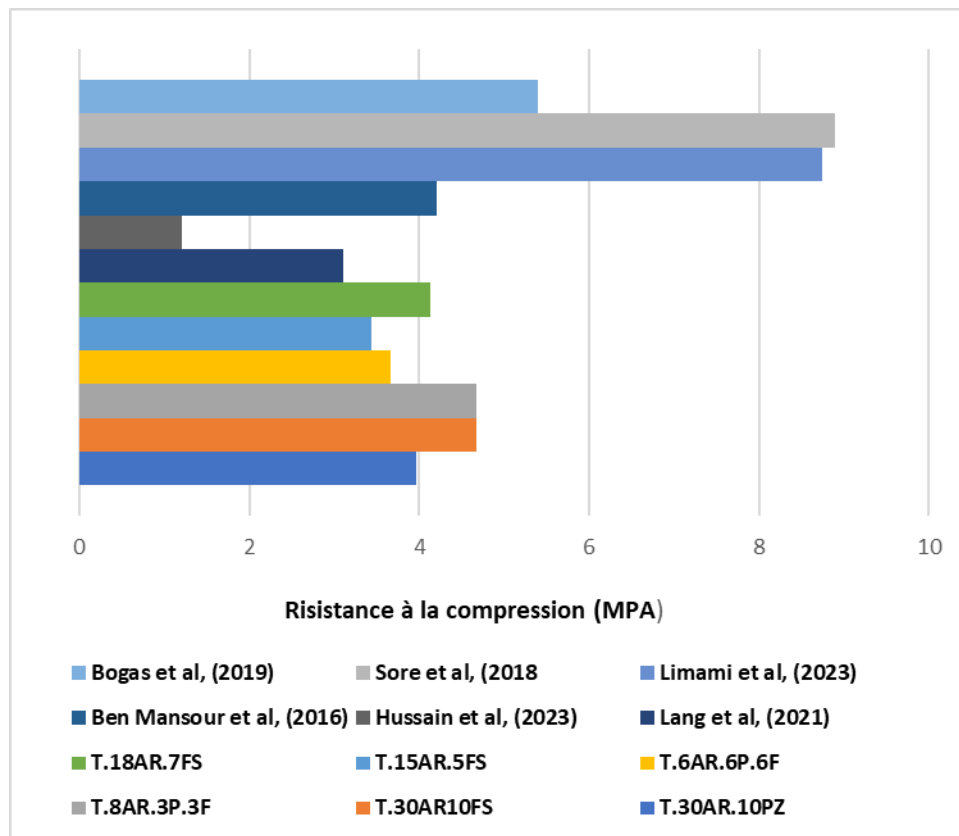


Figure III.6 Comparaison des résultats de résistance à la compression avec la littérature

IV.2 Résistance à l'abrasion :

IV.2.1 Analyse des résultats :

La figure III.7 illustre les valeurs de coefficient d'abrasion pour chaque formulation, où il est observé que :

- La valeur la plus élevée de coefficient d'abrasion est observée sur la brique de terre de formulation T.8AR.3P.3F composée de 86% tuf, 8% argile, 3% pouzzolane, 3% fumée de silice et 15% eau.
- Les formulations T.15AR.5FS et T.18AR.7FS et T.6AR.6P.6F et T.30AR.10PZ et T.30AR10FS ont des valeurs de coefficient d'abrasion les plus faibles.

- Alors les coefficients élevés d'abrasion sont associés à une perte significative de matière, tandis que les coefficients faibles indiquent un arrachement important des particules après le brossage des briques.

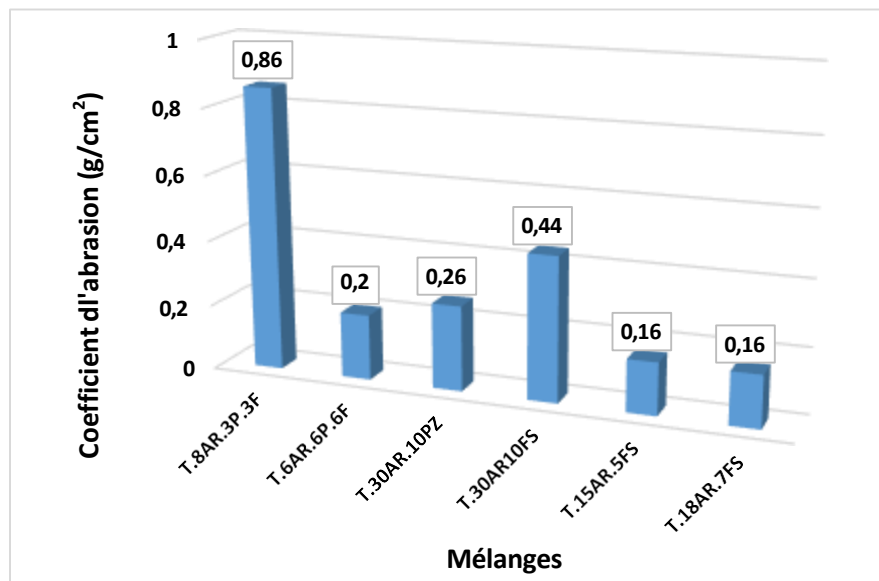


Figure III.7 la variation de coefficient d'abrasion des formulations



T.30AR.10PZ



T,18AR,7FS



T,15AR,5FS

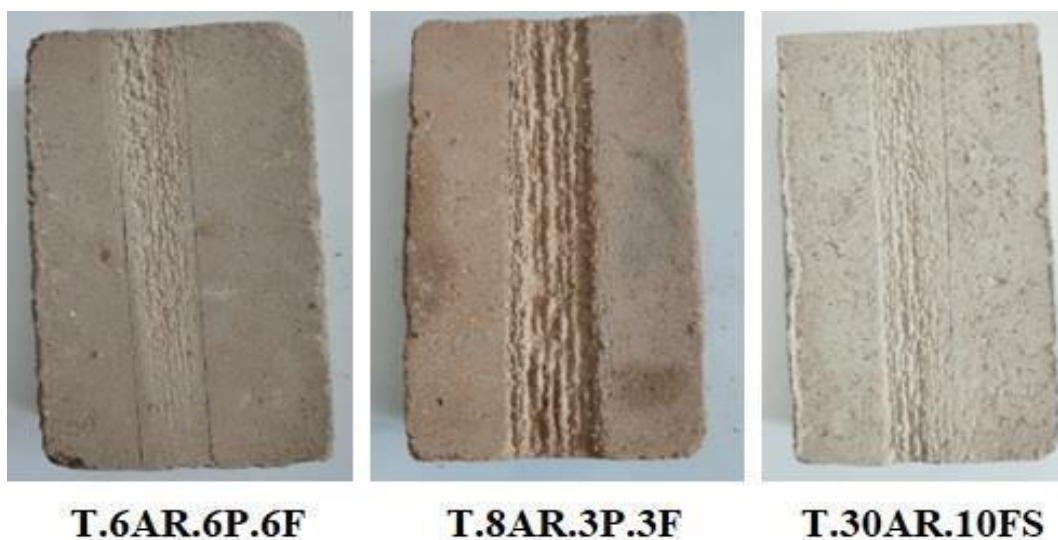


Figure III.8 Etat de brique après l'essai d'abrasion

$$Ca = \frac{M0 - M1}{S}$$

Tableau III.4 résultats de coefficient d'abrasion obtenue

Les formulations	Poids après l'essai (g)	Poids après l'essai (g)	S (cm ²)	Ca (g/cm ²)
T.8AR.3P.3F	1791	1748	50	0.86
T.6AR.6P.6F	1778	1768	50	0.2
T.30AR.10PZ	1854	1841	50	0.44
T.30AR10FS	1847	1825	50	0.26
T.15AR.5FS	1846	1838	50	0.16
T.18AR.7FS	1732	1732	50	0.16

IV.2.2 Classement des résultats obtenus selon la norme XP-P-13-901 :

Selon la norme AFNOR XP P13-901, les briques peuvent être classées en fonction de leur coefficient de résistance à l'abrasion.

Les briques de formulation T.18AR.7FS et T.15AR.5FS et T.6AR.6PA.6FS sont classées dans la classe de résistance à l'abrasion Ab2.

Tandis que la brique T.30AR.10PZ et T.30AR.10FS sont classées dans la classe Ab3, par contre la brique de formulation T.8AR.3PZ.3FS est hors classement avec un coefficient d'abrasion supérieur à 0,5 g/cm².

IV.2.3 Interprétation et récapitulatif des résultats d'essai d'abrasion :

- Les briques de terre comprimée présentent un coefficient d'abrasion élevé, ce qui indique qu'elles sont plus exposées à l'usure et à l'érosion due au frottement.
- La présence de fumée de silice dans la formulation T.30AR.10FS permet d'améliorer la résistance à l'abrasion qui devient de 0,26 g/cm² pour la formulation T.30AR.10FS, par contre la présence de pouzzolane dans la formulation T.30AR.10PZ a conduit à une augmentation du coefficient d'abrasion à 0,44g/cm².
- Les mélanges qui ont montré les meilleures résistances à l'abrasion sont T.18AR.7FS et T.15AR.5FS avec le coefficient d'abrasion le plus petit 0,16 g/cm².

IV.3 Tenue en eau par immersion :

IV.3.1 Analyse de résultat :

La figure III.9 représente le pourcentage de perte de masse des briques en fonction de formulation. On remarque que :

- Le pourcentage le plus élevé de perte de masse dans la formulation (T.6AR,6PZ,6F) composée de 82% tuf, 6% argile, 6% pouzzolane et 15% eau et des pourcentages tout aussi élevés dans les formulations T.30AR.10PZ et T.30AR.10FS et T.8AR.3PZ.3FS.
- La perte de masse la plus faible avec des pourcentages similaires dans les deux formulations T.18AR.7FS et T.15AR.5FS.

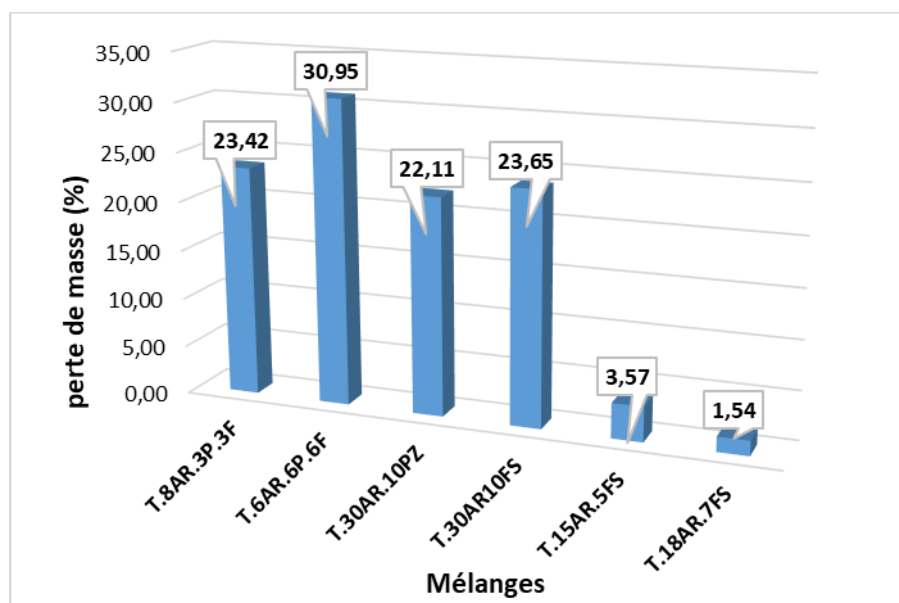


Figure III.9 Perte de masse après essai de tenu a l'eau par immersion pour les différents mélanges

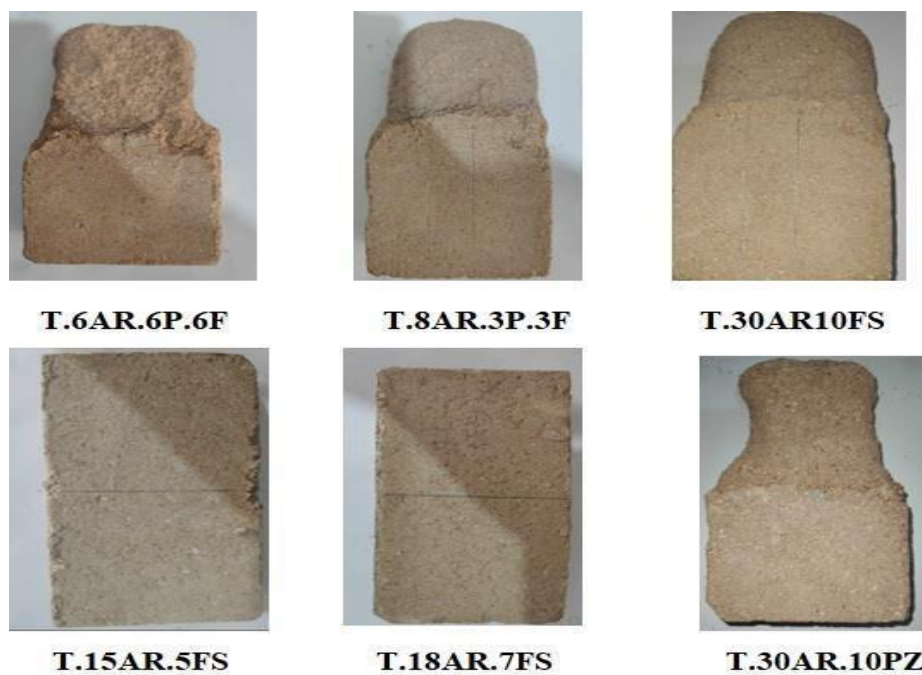


Figure III.10 Etat de brique après l'essai

$$P = \frac{M2 \cdot 100}{M0}$$

Tableau III.5 Résultat de l'essai de tenue à l'eau par immersion

Les formulations	Poids avant l'essai (g)	Poids après l'essai (g)	Perte de masse en (g)	Pert de masse (%)
T.8AR.3P.3F	1.862	1.426	0.436	23.42
T.6AR.6P.6F	1.845	1.274	0.571	30.95
T.30AR.10PZ	1.859	1.448	0.411	22.11
T.30AR.10FS	1.852	1.414	0.438	23.65
T.15AR.5FS	1.794	1.643	0.151	8.42
T.18AR.7FS	1.822	1.661	0.161	8.84

IV.3.2 Interprétation des résultats :

Une faible perte de masse indique que :

- Ces briques ont absorbé peu d'eau lors de l'essai.
- La faible absorption d'eau est généralement perçue comme une caractéristique positive, car cela témoigne d'une résistance à l'infiltration d'eau élevée pour les briques de terre compressée.
- Une brique de terre compressée qui perd peu de masse lorsqu'elle est immergée dans l'eau généralement est plus solide et plus résistante aux humidités. Il est essentiel de prendre en compte cela dans des situations où la brique est soumise à l'humidité ou à des conditions météorologiques défavorables.

En résumé, une faible perte de masse lors de cet essai indique une bonne performance en termes d'imperméabilité à l'eau pour les briques de terre compressée.

Si un essai de tenue à l'eau par immersion de briques de terre compressée présente une perte de masse importante, cela indique que :

- ces briques ont absorbé une quantité importante d'eau lors de l'essai. Autrement dit, la brique a été fortement absorbée par l'eau, ce qui peut suggérer une faible résistance à l'infiltration d'eau de ce matériau.
- On peut considérer que la forte perte de masse dans cet essai est une caractéristique indésirable, car elle indique que la brique de terre compressée n'est pas assez imperméable à l'eau.
- La brique peut être plus susceptible de se dégrader ou de perdre ses caractéristiques structurelles dans de telles circonstances lorsqu'elle est soumise à des conditions humides ou à une humidité prolongée.

En bref, une perte de masse significative lors de cette expérience peut témoigner d'une mauvaise performance en matière d'imperméabilité à l'eau pour les briques de terre compressée, ce qui peut avoir un impact sur leur longévité et leur capacité à être utilisées dans des applications nécessitant une résistance à l'eau.

leur capacité à être utilisées dans des applications nécessitant une résistance à l'eau.

V. Comportement hydrique de brique de terre compressée et stabilisé

La caractérisation hydrique des échantillons stabilisés sera abordée dans cette partie.

V.1 Mesure de la succion:

Dans cette étude, on a utilisé la méthode de papier filtre pour évaluer la capacité d'absorption d'eau des briques de terre compressée.

Il s'agit d'une technique gravimétrique qui implique l'utilisation d'un papier-filtre (le papier Whatman N° 42) dans le matériau étudié afin de mesurer la succion conformément à la norme (ASTM, D. 5298-03). Il est nécessaire de préserver le papier filtre en le plaçant entre deux couches de papier ordinaire. Par la suite, il est nécessaire de recouvrir l'échantillon avec de l'aluminium et de le paraffiner afin de maintenir la teneur en eau initiale constante et de garantir son homogénéisation. Une fois équilibré, le papier filtre humide puis sec est pesé afin de mesurer sa teneur en eau. La succion des échantillons peut être estimée en utilisant la courbe d'étalonnage (figure III.11).

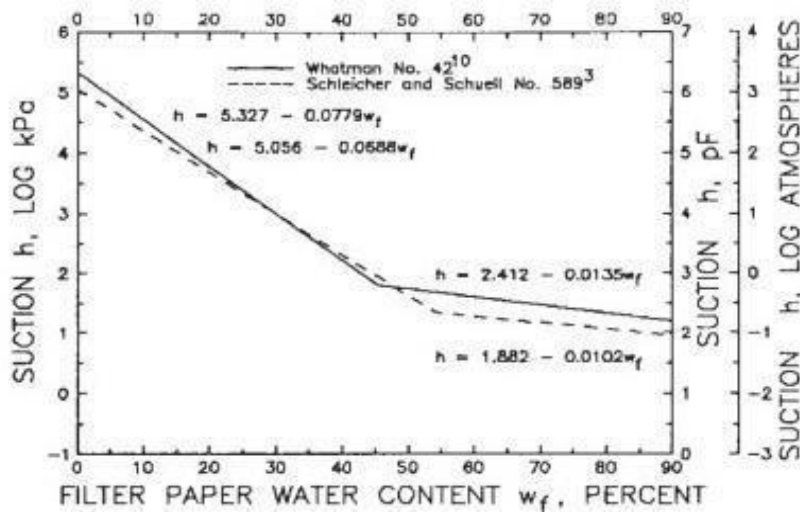


Figure. III. 11. Courbe d'étalonnage pour la détermination de la succion par la méthode du papier filtre. (ASTM, D. 5298-03)

Le tableau III.6 représente les valeur de succion en KPa pour l'ensemble des mélanges pour différents temps de cure (2, 7, 14, 28 jours)

Tableau III.6 résultats de succion obtenue

Le temps de cure (jours)	S (KPA)					
	T.30AR.10PZ	T.30AR10FS	T.6AR.6P.6F	T.8AR.3P.3F	T.18AR.7FS	T.15AR.5FS
2	462	110,9175	190,5461	146	66,5732	57,9
4	58900	119124,2	12705,4	58900	46773,51	22900
7	469000	260615,4	123310,5	262000	131522,5	83000
28	1510000	365594,8	845278,8	733000	231739,5	164000

L'évolution de la succion capillaire en fonction du temps de cure pour l'ensemble des formulations est représenté dans la figure III.12.

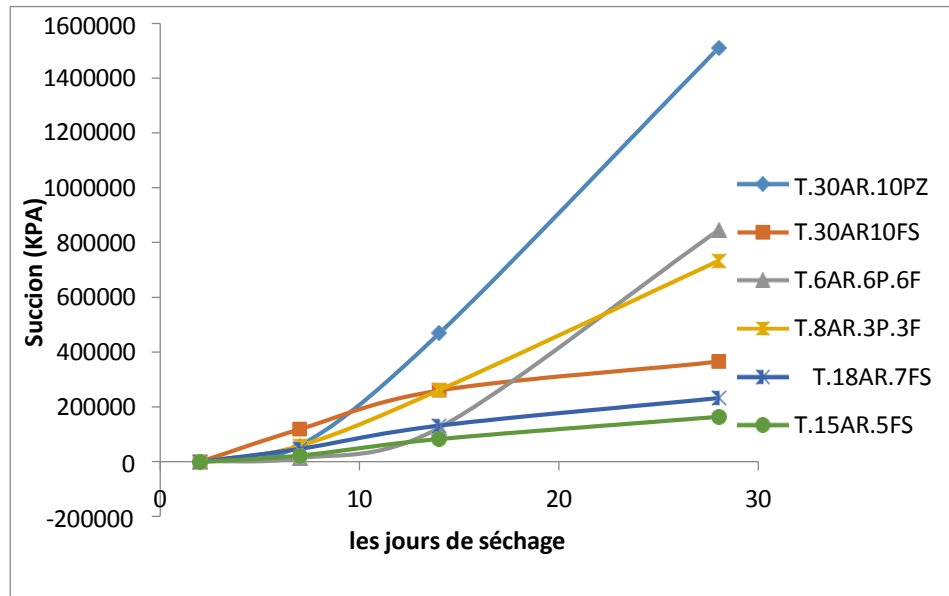


Figure III.12 succion en fonction de temps de séchage

- On remarque sur la figure III.12 que la succion augmente avec l'augmentation de temps de séchage.
- On constate que la succion augmente rapidement entre 2 et 14 jours et a commencé à augmenter légèrement à partir de 14 jours.
- Parmi ces courbes la succion élevée se trouve dans la formulation T.30AR.10PZ.



Figure III.13 les échantillons cylindriques pour essai de succion



Figure III.14 Etat d'échantillon après l'essai

VI. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais réalisés au laboratoire sur la brique de terre compressée, L'examen du comportement mécanique, hydrique de notre matériau permet de tirer les conclusions suivantes :

- la fumée de silice agit comme un agent de renforcement dans nos formulations de notre sol en améliorant les liaisons entre les particules, en réduisant la porosité, en augmentant la densité et en améliorant la durabilité du matériau. Cela se traduit par une augmentation significative de la résistance à la compression des briques de terre compressée dans lesquelles elle est utilisée.
- En fonction de la résistance à l'abrasion, il est possible d'utiliser des briques stabilisées avec de l'argile et de la fumée de silice dans les régions sahariennes où le vent a un effet abrasive.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse détaillée du comportement hydromécanique des briques de terre compressée a révélé plusieurs éléments clés. Dans un premier temps, on a montré que la composition des mélanges de terre et la densité des briques ont une influence importante sur leur résistance à l'eau et leur résistance mécanique. Les briques fabriquées en utilisant des proportions précises de terre, d'eau et d'additifs offrent une stabilité et une durabilité accrues.

La résistance à la compression des briques de terre compressée a été prouvée par des tests de résistance à la compression, avec des résultats satisfaisants dans des conditions normales. L'objectif de l'essai d'abrasion est de déterminer la résistance des briques de terre compressée à l'usure et à l'érosion provoquées par des forces externes, comme le frottement et le contact répété avec des surfaces dures. Les conclusions de cette étude offrent des informations précieuses sur la résistance et la résistance des briques dans des environnements exposés à l'abrasion, comme les zones à fort trafic piétonnier ou les revêtements de sol extérieurs.

L'objectif de cette expérience de résistance à l'eau par immersion est d'évaluer la résistance des briques de terre compressée à l'absorption d'eau et à la dégradation liée dans des conditions d'humidité prolongée. Les conclusions de cette étude donnent des informations essentielles sur les performances des briques en matière de résistance et de résistance à l'eau.

Divers éléments peuvent influencer les résultats de l'essai de tenue à l'eau par immersion, comme la composition du mélange de terre, la densité des briques, la méthode de fabrication et la présence d'additifs ou de stabilisants. Il est possible d'améliorer la résistance à l'eau des briques en utilisant des formulations de mélange appropriées et des techniques de fabrication appropriées, ce qui permet de réduire leur sensibilité à l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

ABAKAR, Ali. Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 2018.

Abdelmadjid, A. S. Etude des comportements mécaniques et de durabilité : Valorisation du tuf en brique de terre compressée stabilisée (BTCs). université abou bekr belkaid tlemcen (These de doctorat) ,07 janvier 2024.

AFNOR Standards- XP P13-901 : Compressed earth blocks for walls and partitions : definitions - Specifications - Test methods - Delivery acceptance conditions, October 2001.

ASTM D6276-99. Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. 427 American Testing and Materials Society, Philadelphia, United States, 1996.

Belaribi, N. B., Semcha, M., & Laoufi, L. (2003). Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Canadian journal of civil engineering, 30(3), 580-584.

Bell, FG. Lime stabilization of clay minerals and soil. Eng. Geol. 42 (4), 223–237, 1996.

Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. Soft Ground Improvement in lowland and other Environments. ASCE Press. New York, 1996.

Boualla, N. (2011). Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments. Mémoire Licence, Université des sciences et de la technologie d'Oran-Algérie.

[BTC, Briques de Terre Comprimée - amàco \(amaco.org\)](http://amaco.org)

Burrough VS. Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction, PhD Thesis , University of New South Wales, Australia, 2001.

C. Delbecque . Histoire de la construction en terre ,21 octobre 2011

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

Centre National d'Etude et de Recherche Intégrés du Bâtiment, 2000.

Collet, F. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil a faibles impacts environnementaux. Thèse, INSA Rennes, 252 p., 2004.

COUSSY Olivier, F. J.-M. « Mécanique des sols non saturés .» janvier 2001

Diffouo, Alexis. «Caractérisation physico mécanique des blocs de terre crue améliorée aux résidus et à la melasse de canne à sucre.» 2019.

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979

Eades, JL, Grim, RE. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research Board Bulletin , n°139, 61-72, 1966.

[GAMME DE BRIQUES DE TERRE COMPRESSÉE de Briques Technic Concept : fiche produit et informations techniques sur Materiaux.archi](#)

[Définition | Brique BTC - Brique BTC - Brique de terre compressée - Terre crue \(futurasciences.com\)](#)

Ghania,A.(2019). Effet des adjuvants fluidifiant sur les propriétés physique et mécanique de la brique de terre stabilisée à la chaux et aux déchets de palmierers dattiers

Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.

Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. Courrier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002.

Guettala A. Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.

Hadjahmed, F., ABOU,M,et al. . UTILISATION DES MATERIAUX LOCAUX DE LA REGION DE TIMIMOUN COMME UN MATERIAU DE CONSTRUCTION (BTC).Thèse de doctorat. Université Ahmed Draia-ADRAR,pp.3-4,2016.

HAMDAOUI, S. (2023). Étude du comportement mécanique et durabilité des briques en terre crue.

Houben H, Gaillaud H. Traité de construction en terre. CRAterre, Edition parenthèse, Marseille, France, 335 p, 2006.

Houben H, Gaillaud H. Earth construction –a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.

<https://www.lavoisier.fr/livre/genie-civil-BTP/mecanique-des-sols-non-satures/coussy/descriptif-9782746202900>

Izemmouren, O. (2016). Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra)..

Jaboviste, C. (2020, 3 juillet). BTC, briques de terre comprimée.

Khodja,Djouhina.,Guerbas,R. effet de type et pourcentage de stabilisation sur la durabilité de brique de terre crue.2020.

[La Brique de Terre Compressée | Art Terre Mayotte \(art-terre-mayotte.org\)](http://art-terre-mayotte.org)

Loréa,S.(2014).Brique en terre crue, développement d'une filière en région wallonne.

Maniatidis, V., Walker, P.J. Structural capacity of rammed earth in compression. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, N° 3, pp. 230 - 238, 2008.

Marcelly, Cédric. La construction en terre crue. 9 aout 2021.

<https://www.ecohabitation.com/guides/2413/la-construction-en-terre-crue/>.

Mekaideche, K, (2021), « Comportement hygrothermique de la terre crue partiellement saturée», Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.

Mekhermeche, A. (2012). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes (Doctoral dissertation).

[Memoire Online - Caractérisation physico mécanique des blocs de terre crue améliorée aux résidus et à la melasse de canne à sucre - Alexis Diffouo](#)

Mesbah A, Morel JC, Olivier M, Comportement des sols fin argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents, Matériaux et constructions, vol 32, N°223, 1999.

Mesbah A, Morel JC, Walker P. and Ghavami Kh. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 95-98, 2004.

Nana, K. L. Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite- muscovite. Limoges : Thèse Doctorat de l'Université de Limoges (France), (2004)

NFP94-051 AFNOR-Standards: Soils investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using Cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread, Mars (1993).

NFP94-057 :AFNOR-Standards:soils investigation and testing granulometric analysis, Hydrometer method. , Mai (1992).

NFP94-093. Détermination des références de compactage d'un matériau. AFNOR, (Octobre 1999).

Olivier M. et Mesbah A . Le matériau terre : essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées. Bull. liaison Labo. P. et Ch., volume146. : pp 37-43, 1986.

Oussama,D. (2018).Valorisation de brique de terre comprimée et stabilisé par du ciment et de la chaux.

P'KLA A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002.

Protas, J. Diffraction des rayonnements Introduction aux concepts et méthodes. Dunod, (1999)

Salim, MERNICHE. Stabilisation naturelle de la terre crue. ENSAPM – Département Transitions – Séminaire de recherche, Ecole Nationale Supérieure de Paris Malaquais 14 rue Bonaparte 75006 Paris,pp.5,2017.

SEBAA. K, (2021), « INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA TERRE CRUE NATURELLE ET TRAITÉE», Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr. Belkaid, Tlemcen.

Taallah, B. (2014). Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

USACE. Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.

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