

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : Génie civil

FILIERE : Génie civil

OPTION : MATERIAUX

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

Par: Khodja Djouhina et Guerbas Rania

Intitulé

**Effet du type et pourcentage de stabilisation sur
la durabilité de la brique de terre crue**

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et prénom Enseignant

Pr .Rahmouni Zine El Abidine

Université M'sila

Président

Pr. BENCHEIKH Mohamed

Université M'sila

Rapporteur

Pr. NASRI Abdelghani

Université M'sila

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020



REMERCIEMENT

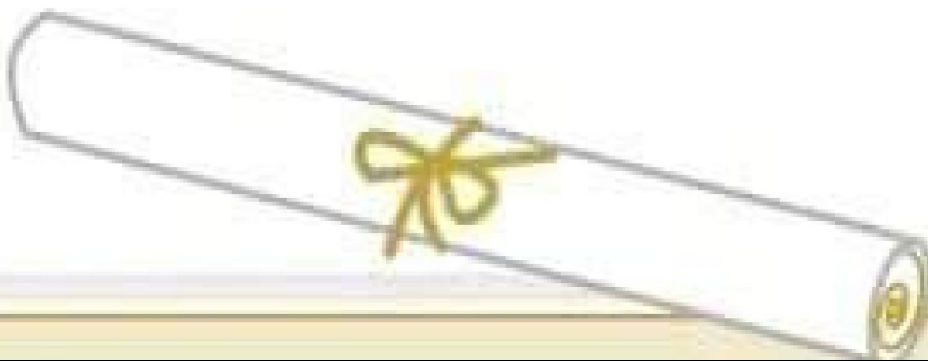
Nous remercions 'DIEU' de nous avoir donné la force, le courage et la volonté qui nous a permis de faire aboutir ce modeste travail .

Nous remercions aussi tout personne ayant contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail et en particulier : Monsieur **BENCHIKH MOHAMED** notre directeur de mémoire, qui nous a proposé ce sujet de mémoire et a accepté de le diriger, qui mérite le grand respect.

Monsieur **BAALI LIAID** chef de département de génie civile.

Nous n'oublions pas non plus de remercies tous les enseignants du département de génie civile en particulier dans notre spécialité Matériaux, avec un remerciement spécial aux étudiants du département de génie civile

Enfin notre reconnaissance à les membres du jury qui nous font l'honneur de juger ce travail .





Dédicace

Je dédie ce travail :

Aux fleurs de ma vie, mes très chers parents pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientation dans ma vie. Mon père Mohamed, Ma mère Ouardia

A mes frères Fakher Addine Abd El Nour

A ma sœur Yasmine

A mes amis Khadidja, Rawia, Sarra, Halima, Rokaya, Awatef, Asma

A tous la promotion de Génie Civile Mastre 2 « Matériaux » 2020

Khodja Djouhina





Dédicace

Je dédie ce travail. Aux fleurs de ma vie, mes très chers parents pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientation dans ma vie. Mon père Mohamed et ma mère Sabine et ma tante Noura et mon frère: Anouar et mes sœurs: Fatima et Zineb et Salma Aux familles: Guerbas et Amon marié «Sadek» de m'avoir aidé et de rester avec moi. A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet Atout la promotion de Génie Civil Master 2 «matériaux» 2020. Ce document doit représenter le mémoire que toute la famille attendait avec ardeur.

GUERBAS RANIA



Résumé :

L'industrie de la construction est une industrie mondiale qui affecte fortement les économies nationales. Partout dans le monde, des entreprises et des chercheurs travaillent au développement de matériaux et de méthodes de construction efficaces pour réaliser des constructions de bonne qualité, économiques et respectueuses de l'environnement. En fait, bien qu'il existe aujourd'hui des matériaux d'ingénierie de haute qualité, leur coût et leur effet sur l'environnement restent un défi de taille à surmonter. L'effet environnemental est un point qui doit être sérieusement pris en considération lors de la réflexion sur la construction de bâtiments, en particulier de nos jours, car les gens sont de plus en plus conscients des conséquences horribles de la nature.

Dans ce contexte, nous sommes intéressés à la valorisation des matériaux locaux (terre brutes) comme matériaux de construction pour leur caractère local et leur faible consommation énergétique qui caractérise leur cycle de vie global. Cependant sa résistance mécanique et sa sensibilité à l'eau relativement faibles ralentissent sa progression, nous avons appliqué la méthode de l'expérience (MPE) dans l'étude des propriétés mécaniques de la brique moulée compacte fixée avec du ciment et de la chaux. Contrairement à d'autres matériaux de construction tels que le béton et l'acier, la structure est relativement imprécise et le sol standard rend difficile l'identification et la distinction de ces matériaux. En effet, les matériaux broyés doivent subir une série de tests pour caractériser leur adéquation à une utilisation dans le secteur de la construction.

La résistance et la durabilité de la terre peuvent être grandement améliorées en ajoutant différents stabilisants dans notre travail. Nous avons utilisé quatre types d'argile et trois types de stabilisants (chaux, ciment, mélange de ciment et de chaux), de sorte que le type de stabilisant et son rapport différent d'un mélange à l'autre, nous avons soumis le matériau préparé au BTC à une résistance à la compression égale à 4 tonnes, les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique puis soumis à un test de résistance (compression) et de durabilité (séchage et mouillage).

MOTS-CLÉS:

Construction, matériaux locaux, durabilité, résistance, stabilisants

ABSTRACT

The construction industry is a global industry which strongly affects national economies. All over the world, companies and researchers are working to develop materials and efficient construction methods to achieve good quality, economical and environmentally friendly constructions. In fact, although there are high quality engineered materials available today, their cost and effect on the environment remains a significant challenge to overcome. The environmental effect is a point that should be seriously considered when thinking about the construction of buildings, especially nowadays, as people are more and more aware of the horrific consequences of nature.

In this context, we are interested in the valuation of local materials (raw earth) as building materials for their local character and their low energy consumption which characterizes their global life cycle. However, its relatively low mechanical strength and sensitivity to water slow its progress · we applied the experimental method (MPE) in the study of the mechanical properties of compact ground brick fixed with cement and lime. Unlike other building materials such as concrete and steel, the structure is relatively imprecise and the standard floor makes it difficult to identify and distinguish between these materials. Indeed, shredded materials must undergo a series of tests to characterize their suitability for use in the construction sector.

The strength and durability of the earth can be greatly improved by adding different stabilizers in our work. We used four types of clay and three types of stabilizers (lime, cement, mixture of cement and lime), so that the type of stabilizer and its ratio differ from mixture to mixture, we submitted the material prepared with BTC at a compressive strength Equal to 4 tonnes , the samples were placed in a climatic chamber and then subjected to a resistance (compression) and durability (drying and wetting) test.

KEYWORDS:

Construction, local materials ,durability ,resistance ,stabilizer

ملخص

صناعة البناء هي صناعة عالمية تؤثر بشدة على الاقتصادات الوطنية. تعمل الشركات والباحثون في جميع أنحاء العالم على تطوير مواد وأساليب بناء فعالة لتحقيق إنشاءات ذات جودة عالية واقتصادية وصديقة للبيئة. في الواقع ، على الرغم من توفر مواد هندسية عالية الجودة اليوم ، إلا أن تكلفتها وتأثيرها على البيئة لا يزال يمثل تحديًا كبيرًا يجب التغلب عليه. التأثير البيئي هو نقطة يجب أخذها في الاعتبار بجدية عند التفكير في تشييد المباني ، خاصة في الوقت الحاضر ، حيث أصبح الناس أكثر وعيًا بالعواقب المروعة للطبيعة.

في هذا السياق ، نحن مهتمون بثمين المواد المحلية (الأرض الخام) كمواد بناء لطابعها المحلي واستهلاكها المنخفض للطاقة الذي يميز دورة حياتها العالمية. ومع ذلك ، فإن قوتها الميكانيكية المنخفضة نسبيًا وحساسيتها للماء تبطئ من تقدمه - طبقنا الطريقة التجريبية (MPE) في دراسة الخواص الميكانيكية للظوب الأرضي المضغوط المثبت بالأسمنت والجير. على عكس مواد البناء الأخرى مثل الخرسانة والصلب ، فإن الهيكل غير دقيق نسبيًا والأرضية القياسية تجعل من الصعب تحديد هذه المواد والتميز بينها. في الواقع ، يجب أن تخضع المواد المقطعة لسلسلة من الاختبارات لتحديد مدى ملاءمتها للاستخدام في قطاع البناء.

يمكن تحسين قوة ومتانة الأرض بشكل كبير عن طريق إضافة مثبتات مختلفة في عملنا. استخدمنا أربعة أنواع من الطين وثلاثة أنواع من المثبتات (الجير ، الأسمنت ، خليط الأسمنت والجير) ، بحيث يختلف نوع المثبت ونسبته من خليط إلى خليط ، قدمنا تم تحضير المادة باستخدام BTC عند مقاومة ضغط تعادل 4 أطنان ، ثم وضع العينات في غرفة مناخية ثم إخضاعها لاختبار المقاومة (الضغط) والمتانة (التجفيف والترطيب).

الكلمات المفتاحية :

البناء ، المواد المحلية ، المتانة ، المقاومة ، المثبتات

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : LA TERRE, UNE MATIERE ET UNE ARCHITECTURE

I. 1. Introduction	5
I.2. Qu'est ce que la terre?	5
I .3. LE MATERIAU TERRE :	6
I.3.1. Au niveau géologique	6
I.3.2. Au niveau microscopique :	6
1.4. Les caractéristiques du matériau terre :	8
I.4.1. La résistance mécanique :	9
1.4.2. Masse volumique:	9
I.4.3. Le coefficient de conductivité thermique λ	9
I.4.4. La résistance thermique R	10
I.4.5. La capacité thermique S	10
I.4.6. L'effusivité thermique E_f	11
I .4.7. Le déphasage thermique	11
I.4.8. Le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ	12
I .4.9. La capillarité.....	12
I.5. L'ARCHITECTURE DE TERRE	13
I.5.1. Histoire	13
I.5.1.1. Antiquité.....	14
I.5.1. 2.Moyen-âge.....	15
I.5.1.3. La renaissance	16
I.5.1.4. L'ère contemporaine	17
I.6. La construction en terre en Algérie :	18
I.7. L'inter de la construction terre crue :(social et Environnement et Economique).....	21
I.8. Les avantages et les inconvénients des constructions en terre :	22
I.8.1. Avantages des architecteurs de terre crue :	22
I.8.1.2Avantages pour l'environnement :	22
I.8.1.3.Avantages Economiques :	23
I.8.1.4.Avantages Sociétaux :	23
I.8.2.Les inconvénients des architecteurs de terre crue :	24
I.9.LES DIFFERENTS TYPES DE CONSTRUCTION EN TERRE :	24

I.9.1.L'adobe :	24
-I.9.1.1.Définition :	24
I.9.1.2.La production :	25
I.9.1.3. Modes de production de l'adobe :	25
I.9.1.4.Les produits :	26
I.9.1.5.Les avantages de l'adobe :	26
I.9.1.5.Les inconvénients de l'adobe :	26
I.9.2.Le pisé :	27
I.9.2.1. définition :	27
I.9.2.2.Technique de production:	28
I.9.2.3. Les produits (différents types de pisé) :	28
I.9.2.4. Les Avantages de pisé :	29
I.9.2.4.Les inconvénients de pisé:	29
I.9.3.La bauge (terre-paille):	29
I.9.3.1.Définition	29
I.9.3.2.Technique de constructions :	29
I.9.3.3.Avantage:	29
I.9.3.4.Inconvénients:	29
I.9.4.Le torchis:	29
I.9.4.1.Définition	29
I.9.4.2.Technique de constructions:	29
I.9.4.3. Avantage:	30
I.9.4.4.Inconvénients:	30
I.10.CONCLUSION :	30

CHAPITRE II : BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE

II.1.Introduction :	32
II.2.Blocs de terre comprimée :	32
II.2.1.Définition :	32
II.2.2. Processus de production des BTC :	32
II.2.3.Les Avantages de bloc de terre comprimée.....	33
II.2.4.Inconvénients :	34
II.2.5.Les utilisations de la brique de terre compressée.....	34
II.3.Pathologies des constructions :	35
II.3.1.Les principaux lieux et causes de désordres.....	35
II.3.2.Les différents types humides :	37
II.3.3.Les pathologies liées à l'humidité :	37

II.3.4.Les pathologies structurelles :	38
II.4.Le point faible de la construction en terre :	39
II.5.Les points forts de la construction en terre	39
II.6.Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de terre :	40
II.6.1.Stabilisation :	40
II.6.1.1.Stabilisation mécanique :	40
II.6.1.2.Stabilisation chimique :	40
II.6.1.3.Stabilisation physique :	41
II.6.1.4.La stabilisation physico-chimique :	41
II.6.1.5.La stabilisation au ciment :	41
II.6.1.6.La stabilisation à la chaux :	42
II.6.1.7.Stabilisation mixte chaux-ciment :	42
II.6.1.8.La stabilisation au bitume :	43
II.6.2.Moyens de stabilisation	44
II.6.3.Rôle de la stabilisation de la chaux	45
II.6.4. Rôle de l'association de la chaux et du ciment comme stabilisants dans le BTCS :	45
II.7.L'ajout de fibres.....	47
II.7.1.L'ajout de fibres joue plusieurs rôles.....	47
II.7.2.Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction	47
II.8.Les ajouts minéraux.....	48
II.8.1.Pouzzolane naturelle :	48
II.8.1.1.Activité pouzzolanique	48
II.8.1.2.Utilisation	49
II.8.2.Laitier de haut fourneau.....	49
II.8.2.1Généralités	49
II.8.2.2.Activation du laitier	49
II.8.2.3.Utilisation	50
II.8.3.Poudre de verre.....	50
II.8.3.1.Utilisation	50
II.9.Le compactage :	50
II.9.1.Mode de compactage.....	51
II.9.1.1.Le compactage dynamique.....	51
II.9.1.2.Le compactage statique.	52
II.9.1.3.La vibro-compression	52
II.9.2.Influence de l'énergie de compactage	52
II.10.Comment protéger une construction en terre contre les attaques chimiques ou climatiques ?	53

II.11.La relation entre le taux d'eau (teneur en eau) de la brique et durabilité :.....	53
II.12.Les essais expérimentaux pour évaluer la durabilité d'une brique de terre :.....	54
II.12.1.Résistance à la compression sèche	54
II.12.2.Résistance à la compression humide	55
II.12.3.Absorption capillaire	55
II.12.4.Absorption totale	55
II.12.5.Congélation et décongélation	56
II.12.6.Test de pulvérisation	56
II.12.7.Essai de brosse métallique :	56
II.12.8.Essai de goutte-à-goutte ("drip test")	57
II.12.9.Rapport de la résistance humide et à sec ("wet to dry strength ratio")	58
II.12.10.Exposition aux conditions climatiques	58
II.12.11.Essai mouillage et de séchage	58

CHABITERE III : PROCEDUR EXPERIMENTALE

III.1.Introduction :	61
III.3.Origine de terre :	61
III.4.Essais d'identifications :	61
III.5.Matériel spécifiques :	62
III.5.1.Moule utilisés :	62
III.5.2.Presse manuelle :	63
III.6.Préparation de Mélange :	63
III.6.1.Etapes de préparation des mélanges :	63
III.7.Préparation du mélange :	65
III.10.Conclusion :	65

CHAPITRE IV : METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE

IV.1.INTRODUCTION :	67
IV.2 .Qu'est ce que un plan d'expérience :	67
IV .3.Choix de la méthode d'expérimentation :	67
IV.4 .Le plan factoriel complet et le plan factoriel fractionnel	67
IV.4.1 .Plans factoriels complets à deux niveaux.....	67
IV.4.2Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux 2k-q.....	67
IV.5 .L a réponses :	68
IV .6 .Facteurs :	68
IV.7. Les niveaux des facteur	68

IV.8.Logiciels utilisés :	68
IV.8.1.Présentation de logiciel « Mini tab » :	68
IV.8.2.Diagramme de Pareto :	69
IV.8.3.Diagramme des effets principaux :	69
IV.8.4.Diagramme des interactions :	69
IV.8.5.Equation de régression :	69
IV.9.Conclusion :	70

CHAPITRE V : ANALYSES DE RESULTATS

V-1 Analyses de résultats:	72
V-2 .interprétation des résultats des diagrammes :	74
V.2.1. diagramme de Pareto des effets pour la perte de masse	74
V.2.2. diagramme de Pareto des effets pour la résistance	75
V.2.3. L'effet de chaque facteur pris individuellement sur la perte de masse	76
V.2.4. l'interaction des facteurs prise deux à deux sur la perte de masse.....	76
V. 2.5. l'interaction des facteurs prise deux à deux sur la résistance	77
V.2.6. La modélisation par une équation mathématique	78
V.2.6.1. Equation de régression en unité codé	78
Conclusion générale	82

Liste des références

Liste des figures :

Figure .I.1 : Architecture de terre dans le monde	14
Figure I.2. : Ziggourat de Babylon, ou tour de Babel	15
Figure I.3. Masquée de Bobo-Dioulasso au burkina faso (gauche) et remparts massifs de l'Alhambra à grenade (droite).....	16
Figure I.4. Le Manhattan du désert à Shibam au Yémen	17
Figure I.5 : Centre de l'Architecture de Terre, Mali.....	18
Figure I.6 :logements en B.T.C à Tamanrasset (Le CNERIB).....	20
Figure I.7: Prototypé achaevé.....	20
Figure I.8: premières assises du prototype de Souidania 1999.....	20
Figure. I.9 : maison en pisé au village Madher à Boussada.....	21
Figure I. 10 (a), (b) maison traditionnelle en adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye.....	25
Figure I.11 :Mur extérieur en adobe(terre crue).....	25
Figure I.12: Le démoulage des briques d'adobe manuel.....	26
Figure I.13. :coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé.....	27
Figure I .14. patrimoine en pisé.....	27
Figure I .15 : construction un mur en pisé.....	28
Figure. I.16: Construction en torchis (Sources Internet).....	30
Figure II.1: :cycle de production BTC.....	33
Figure II.2: L'action du vent en haut et bas d'un mur en adobe.....	36
Figure II.3: Fléchissement d'un plancher.....	38
Figure II.4: types de stabilisants.....	43
Figure II.5. : Effet du compactage sur les vides des sols.....	49
Figure.II .6 : Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol.....	51
Figure II.7.: cassure des blocs par l'essai de traction (a) , superposition de deux demi-blocs (interposition par un mortier de ciment)(b)essai d'écrasement de l'éprouvette La résistance.....	53
Figure. II.8: principe de l'essai d'absorption capillaire.....	54
Figure I I.9 : brosse d'acier pour essai d'abrasion, calcul de surface de brosse Norme XP 13-901.....	55
Figure II.10 :l'essai de goutte-à-goutte (drip test).....	56
Figure II.11 : Vue générale des murs construits.....	56
Figure II .12: Eprouvette séchée dans l'étuve.....	57
Figure II.13: Eprouvette émergée dans l'eau.....	57
Figure III.1 :L'argile grise.....	59
Figure III.2 :L'argile verte	59
Figure III.3: L'argile rouge.....	59
Figure III.4: L'argile Blanche.....	59
Figure III.5. Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9).....	60
Figure III .6 . Les limites d'Atterberg (NF P94-051).....	60
Figure .III.7. Analyse granulométrique tamisage. (NF P 94-056).....	60
Figure.III.8 : moule utilisé.....	61
Figure III .9: Des éprouvettes confectionnées.....	61
Figure III.10 : chambre de cure (Température ,Humidité).....	61
Figure III.11: presse manuelle.....	62
Figure III.12 : presse hydraulique.....	62
Figure III.13: cassure des blocs par l'essai de traction (a) , superposition de deux demi-blocs (interposition par un mortier de ciment)(b)essai d'écrasement de l'éprouvette La résistance.....	62
Figure V.1. Diagramme des effets pour la perte de masse.....	71
Figure .V.2. Diagramme des effets pour la résistance.....	72
Figure V.3. Graphique des effets des facteurs sur la perte de masse.....	73
Figure V.4. Diagramme des interactions pour la perte de masse.....	73
Figure .V.5. Diagramme des interactions pour la résistance	74

Liste des tableaux

Tableau I.1. L'opération de construction en terre en Algérie.....	19
Tableau II.1. Moyens de stabilisation des terres remaniées	44
Tableau II.1. Recommandation de gamme de compactage.....	52
Tableau III.1 : élaboration des éprouvettes.....	61
Tableau V.1 : Les données et résultats pour Les pertes des masses et les résistances obtenus des BTC	70

Introduction générale

Introduction générale :

L'industrie de la construction est une industrie mondiale qui affecte fortement les économies nationales. Partout dans le monde, des entreprises et des chercheurs travaillent au développement de matériaux et de méthodes de construction efficaces pour réaliser des constructions de bonne qualité, économiques et respectueuses de l'environnement. En fait, bien qu'il existe aujourd'hui des matériaux d'ingénierie de haute qualité, leur coût et leur effet sur l'environnement restent un défi de taille à surmonter. L'effet environnemental est un point qui doit être sérieusement pris en considération lors de la réflexion sur la construction de bâtiments, en particulier de nos jours, car les gens sont de plus en plus conscients des horribles conséquences de nuire à la nature et de la nécessité de préserver ce que l'environnement peut offrir nous. (Amaziam, 2018)

Le monde entier parle maintenant de remplacer les méthodes et les matériaux de construction actuels par des bâtiments écologiques. Même s'il est important de noter que le concept de bâtiments verts n'est pas nouveau, mais qu'il est maintenant plus que jamais nécessaire en raison des problèmes auxquels la Terre est actuellement confrontée, comme le réchauffement climatique. Comme l'écrit la Dr Julie Cidell du Département de géographie de l'Illinois à l'Université Urbana-Champaign dans son article «construire la qualité, bâtir vert : théorie des conventions et transformation de l'industrie », «Un« bâtiment vert »prend en compte l'environnement lors de la production d'un structure (Amaziam, 2018)

La demande en écomatériaux de construction augmente. L'utilisation de la terre dans la construction de logements est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus couramment utilisées. Les blocs de terre comprimée (BTC) sont devenus le principal matériau de construction dans les villes anciennes telles que Jéricho (Palestine), AtalHuyuk (Turquie), Harappa (Pakistan), Akhlet-Aton (Égypte), ChanChan (Pérou), Babylone (Irak) , Duheros (España), entre autres, comme indiqué dans les études précédentes . Au cours des 50 dernières années, ils se sont développés et ont été de plus en plus utilisés, en particulier dans les pays en développement. La Terre peut être définie comme un sol argileux avec une quantité et un type variables de minéraux argileux, qui est largement utilisé depuis des milliers d'années. Des variations considérables dans la composition du sol argileux font de la mesure de la résistance à la compression et d'autres caractéristiques physiques des BTC une mesure de contrôle de la qualité importante pour les fabricants et les constructeurs. Les BTC (briques séchées au soleil) sont l'un des plus anciens matériaux de construction artificiels identifiables en raison de leur simplicité et de leur faible coût, de leurs bonnes propriétés thermiques et acoustiques, et à la fin de la vie d'un bâtiment, le matériau argileux peut facilement être réutilisé par broyage, mouillé ou retourné au sol sans aucune interférence avec l'environnement. (Villamizar, Araque, & Reyes, 2012)

Introduction générale

En raison de la grande utilité des capacités naturelles de chaque région, du manque de transports nécessaires, de la grande disponibilité des matières premières, du manque de main-d'œuvre spécialisée et de la faible utilisation d'énergie. Cependant, il existe peu de propriétés indésirables telles que la perte de résistance à la saturation en eau, l'érosion due au vent ou à la pluie battante et une mauvaise stabilité dimensionnelle. Aujourd'hui, ce problème peut être éliminé de manière significative, sont fabriqués en utilisant des stabilisateurs pour fournir une résistance à la compression et une durabilité adéquates, afin de les rendre appropriés comme blocs de construction. Bien que le ciment soit un stabilisant populaire utilisé dans la fabrication des BTSC, aucune étude n'a été rapportée utilisant de la chaux en combinaison avec du ciment. Cette étude expérimentale sur les BTSC préparés en utilisant de la chaux en remplacement du ciment dans certaines proportions a clairement mis en évidence l'efficacité de la chaux avec du ciment pour améliorer l'accumulation de résistance à long terme mieux que l'utilisation de ciment seul. Il a été observé que les blocs préparés avec une quantité optimale de chaux avec du ciment ont conduit à une accumulation continue de résistance même au-delà de 2 ans, tandis que les blocs préparés avec du ciment seul et une quantité de chaux inférieure à la quantité optimale n'ont pas acquis beaucoup de résistance après 6 mois à partir de temps de préparation des blocs. Les résultats de la recherche montrent la nécessité de revoir la classification des ingrédients et la quantité de stabilisants pour obtenir de bons éléments constitutifs. Ce serait un avantage supplémentaire non seulement en réduisant le coût des blocs, mais cela aurait également de sérieuses implications en termes de réduction de l'énergie consommée dans la fabrication des blocs lorsqu'ils sont effectués à grande échelle. (H.B.Nagaraj, M.V.Sravan, T.G.Arun, & k.S.Jagadish, 2014)

Introduction générale

Problématique

Les coûts énergétiques associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. Le développement de pratiques de construction durables est donc primordial, non seulement afin de se conformer aux objectifs actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour limiter la consommation d'énergie à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, le développement de matériaux de construction économes en énergie, mais aussi dont les impacts environnementaux sont limités et notamment en terme d'épuisement des ressources, apparaît comme un challenge prometteur. Une des possibilités est l'utilisation de terre crue compressée matériau local et dont la mise en forme ne nécessite que peu d'énergie, il peut être entièrement recyclable.

Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. malgré ces avantages, des freins subsistent à la diffusion de cette pratique constructive, comme notamment la faible résistance mécanique et rigidité de la terre crue compressée. La stabilisation de ce matériau par l'addition de liants chimiques (ciment ou chaux) permet d'en améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité. Cependant ces ajouts contrebalancent les bénéfiques environnementaux de la terre crue et limitent sa recyclabilité après démolition.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire Particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique avant tout par la volonté de résoudre la crise du logement ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable, et fabrique des matériaux de construction abordables et de haute qualité .

-Objective :

L'objectif de ce travail est de fabriquer des briques de terre compactes à base de matériaux locaux (terre) et d'étudier leurs interactions avec les stabilisants (ciment, chaux) afin d'obtenir des BTCS durable et abordables. Mais le problème est de trouver le mélange le plus approprié et de déterminer la teneur optimale en ciment et chaux pour différents types de sols

CHAPITRE 01 :
LA TERRE, UNE MATIERE ET UNE
ARCHITECTURE

I. 1. Introduction

La terre, avec du bois et de la pierre, est probablement le matériau de construction le plus ancien connu au monde. Il a été utilisé dans de nombreux domaines et par la plupart des civilisations de l'histoire, avec le plus ancien cas enregistré de son utilisation dans le domaine de la construction datant de la Mésopotamie autour de 10 000 avant JC. Construire avec de la terre est courant dans tous les climats chauds, subtropicaux et modérés, avec une expression majeure en moins. Pays développés où la majorité de ces constructions sont situées Dans les économies avancées, la terre a été intensivement utilisée pour la construction jusqu'à la fin du XIXe siècle. Après cette date, le ciment a été développé et préféré pour la construction. Cependant, au cours des 20 dernières années, la terre a été reconsidérée comme un matériau pertinent pour la construction dans les économies avancées, essentiellement en raison de son faible impact sur l'environnement et de sa capacité à réguler les conditions hydrothermales du climat intérieur. (J.AUBERT, A.Marcom, P.Oliva, & P.Segui, 2014)

On présente ici aperçu historique la construction en terre, ses caractéristiques.et avantages et inconvénients .

I.2. Qu'est ce que la terre?

La terre, matériau le plus disponible à travers le monde, est utilisé en construction depuis des temps immémoriaux. Elle représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre résultant de la transformation de la roche mère. Nous pouvons dire que c'est un matériau qui ne nécessite pas de le présenter ou le publier pour être utilisable, comme l'avance dit Pierre Clément: « la terre est un matériau de construction dont la publicité n'est plus à faire... Alors, la terre, abondante, malléable, facile à mettre en oeuvre, plastique et offrant une grande inertie thermique capte les regards des spécialistes.» (Iamouri-Hannani, 2014)

I.3. LE MATERIAU TERRE :

I.3.1. Au niveau géologique

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

Ainsi, la terre présente à la surface de notre planète peut être transformée facilement pour constituer un matériau de construction idéal. Les grains très fins la constituant peuvent être agglomérés entre eux lorsqu'on les mélange avec de l'eau et les met en forme.

L'excès d'eau va progressivement s'échapper pour être remplacé par l'air. Le mélange grain, air et eau forme un complexe relativement solide, permettant de construire. C'est le passage « du grain à l'architecture »

Le sol est composé de plusieurs couches. La première strate est composée de terre végétale, ou humus, contenant des résidus végétaux. La profondeur de cette couche organique dépasse rarement 1 à 2 mètres. La seconde couche est une terre minérale, sans résidus. C'est cette strate qui est employée pour construire en terre crue. Ce sol utilisable se trouve rarement à de grandes profondeurs (trop de pierres, voire de roches solides). La hauteur des couches utilisables varie considérablement, de quelques centimètres à plusieurs mètres. (D.Miraucourt, 2017)

I.3.2. Au niveau microscopique :

La partie microscopique de la terre est constituée par nature de différentes phases. La première est la phase liquide, contenant majoritairement de l'eau et quelques corps en solution. La seconde est la phase gazeuse, qui contient essentiellement de l'air. Enfin, la phase solide comprend des matières minérales et organiques insolubles dans l'eau.

L'air ne joue pas un rôle prépondérant, et on cherche à réduire son incorporation dans les terres. L'eau par contre est un facteur important et se présente sous plusieurs formes. L'eau

libre est mobile par gravitation ou capillarité en fonction des paramètres thermohydriques. L'eau interstitielle est contenue dans les pores fins où la capillarité la retient, et peut être éliminée par séchage en étuve.

Les matières organiques sont constituées de débris divers d'origine animale ou végétale qu'ils soient vivants ou dans un état de décomposition plus ou moins avancé. L'humus constitue la partie la plus stable des matières organiques. Ces constituants font la richesse de la fine couche arable qui permet

Les matières minérales sont issues de l'altération de la roche mère et forment la partie mécanique du sol. Elles sont des fragments de la roche initiale et des minéraux silicatés ou calcaires. Ce sont celles-ci qui forment le matériau principal de construction et que l'on nommera terre crue pour la suite. Les éléments minéraux sont généralement majoritaires dans le sol. Selon leur état, on peut les classer en deux sous-catégories) :

- Minéraux non dégradés : semblables à la roche mère, ils sont constitués des graviers, sables et silts,
- Minéraux dégradés : ils ont été fortement altérés et forment par leur taille réduite ($2\mu\text{m}$), une pâte collante en présence d'eau. On les dénomme colloïdes de par la propriété collante qu'ils confèrent à la terre. Ils sont principalement constitués d'argiles.

(D.Miraucourt, 2017)

-Des grains

Les sols sont constitués de différentes proportions de quatre types de matériaux sous forme de grains. On retrouve dans un ordre granulométrique décroissant les graviers, les sables, les limons et les argiles. Ces quatre types de grains se comportent de façon différente vis-à-vis de paramètres extérieurs comme l'hygrométrie. Les graviers et les sables sont stables, tandis que les limons et argiles subissent des variations liées à leur environnement. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire la capacité à résister à une humidité et à un dessèchement sans changement de propriétés, revêt une importance fondamentale pour un matériau de construction.

- Les graviers de 2 à 20mm : sont constitués de morceaux de roche originelle de dureté variable. Ils forment le squelette stable du sol. Leurs propriétés mécaniques ne subissent aucun changement détectable en présence d'eau et limitent donc retrait et capillarité.
- Les sables de 0,06 et 2 mm : Également des constituants stables composés principalement de quartz et de silice, ils manquent de cohésion à sec mais présentent une grande friction interne. Lorsqu'ils sont mouillés, ils présentent une cohésion apparente en raison de la tension superficielle de l'eau occupant les vides entre les particules. Leur perméabilité et leur structure ouverte sont caractéristiques.
- Les silts de 0,002 et 0,06 mm : Les fractions silteuses sont assimilables aux sables mais avec un diamètre moindre et une perméabilité plus élevée. Lorsqu'ils sont exposés à différents niveaux d'humidité, ils gonflent et se rétrécissent, évoluant sensiblement en volume.
- Les colloïdes inférieurs à 2 μm : cette catégorie comprend majoritairement des argiles mais il existe dans d'autres colloïdes composés de particules très fines cristallisées ou organiques. Les graviers, les sables et, dans une moindre mesure, les limons se caractérisent donc par leur stabilité en présence d'eau. Lorsqu'ils sont secs, ils ont peu ou pas de cohésion et, par conséquent, ils ne peuvent pas être utilisés seuls comme matériaux principaux d'un bâtiment. (D.Miraucourt, 2017)

-Les argiles

Les argiles font partie des colloïdes et sont extrêmement importants pour la cohésion des sols. Elles sont des particules minérales microscopiques avec des caractéristiques complètement différentes des silts, sables et graviers d'un point de vue chimique comme physique. Elles sont composées d'aluminosilicates hydratés formés suite à la dégradation de minéraux rocheux originaux. Leur morphologie est de type plat en lamelles ce qui explique leur importante surface spécifique (D.Miraucourt, 2017)

1.4. Les caractéristiques du matériau terre :

Comme tous les autres matériaux de construction, les caractéristiques thermiques, acoustiques et autres peuvent être définies au travers de certains paramètres. Une

comparaison avec les autres matériaux d'une même unité fonctionnelle permet d'évaluer ses performances. Les valeurs indiquées ici sont générales. Des informations plus précises sur les caractéristiques des briques de terre crue des différents producteurs wallons se trouvent dans l'annexe. (Loréa, 2014)

1.4.1. La résistance mécanique :

La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Du point de vue mécanique, elle fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression (les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles). Les éléments de maçonnerie (adobes) ont des résistances à la compression pouvant aller de 20 kg/cm² à 50 kg/cm² (2 MPa à 5 MPa). L'adjonction d'éléments fibreux (paille par exemple) permet de conférer au mélange une certaine résistance en traction, flexion et cisaillement, mais qui reste tout de même négligeable.

Il y a des essais faits (essai brésilien) montrent que les résistances à la traction égale le cinquième (1/5) de la résistance à la compression.

La résistance mécanique à la compression peut être améliorée et prendre des valeurs supérieures à 300 daN/cm² (30 MPa) par l'application des traitements basés sur l'addition des proportions de ciment, et/ou de chaux et/ou du filler. (Iamouri-Hannani, 2014)

1.4.2. Masse volumique:

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre. Elle s'étale de 1 200 kg/m³ à 1 600 kg/m³ pour de la terre foisonnée (dans un tas de terre par exemple). Cette valeur augmente suite à une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors idéalement une masse volumique de 2 000 kg/m³. Les mélanges amendés en paille sont plus légers: en terre-paille, la masse volumique est de 300 kg/m³ à 1 300 kg/m³. (Iamouri-Hannani, 2014)

1.4.3. Le coefficient de conductivité thermique λ

Indépendant de l'épaisseur du matériau, il définit la valeur isolante de ce dernier. Il mesure le flux de chaleur qui traverse une surface d'1m² pour une épaisseur d'1m. La différence de T° est d'1°C entre les deux faces. Le coefficient λ s'exprime en (W/m.°C). Plus il est élevé, moins le matériau est isolant.

Exemples de conductivité thermique pour les matériaux de gros œuvre :

- terre sèche: 0,75 (W/m. °C) ;
- béton cellulaire: 0,14 - 0,23 (W/m. °C) ;
- briques de terre cuite: 0,3 - 0,96 (W/m. °C) ;
- béton ordinaire: 1,6 - 2,1 (W/m. °C).

Une valeur λ_r tient compte de la teneur en eau résiduelle du matériau. Plus cette valeur est élevée, plus le pouvoir isolant du matériau est faible. Ainsi, la terre sèche possède une capacité isolante assez faible eût égard à celle des matériaux isolants (0,045 W/m.°C pour la fibre de bois) , mais reste supérieure à celle du béton et de la terre cuite. (Loréa, 2014)

I.4.4. La résistance thermique R

La résistance thermique d'un matériau est sa capacité à freiner l'écoulement de la chaleur à travers ce dernier. Ainsi, plus elle est élevée, plus le matériau est isolant. La résistance thermique se base sur le rapport $R=e/\lambda$ où e est l'épaisseur du matériau et λ sa conductivité thermique. R augmente avec la densité du matériau.

Exemple de résistance thermique des matériaux de gros œuvre pour une épaisseur de 14 cm:

- terre sèche: $R = 0,19$;
- béton cellulaire: $R = 1 - 0,61$;
- briques de terre cuite: $R = 0,47 - 0,15$;
- béton ordinaire: $R = 0,09 - 0,07$.

Une fois encore, la valeur de la terre sèche est inférieure à celle des matériaux d'isolation (3,1 pour 14 cm d'isolation en fibre de bois), mais reste supérieure à celle du béton et de la terre cuite. (Loréa, 2014)

I.4.5. La capacité thermique S

La capacité thermique d'un matériau est sa capacité à emmagasiner de la chaleur. Il s'agit de la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'1°C la température d'un volume d'1m³ du matériau. Plus la densité du matériau est élevée, plus sa capacité thermique augmente. Elle s'exprime en kj/m³. °C.

D'autre part, un matériau à faible capacité thermique se réchauffera plus rapidement qu'un matériau à forte capacité thermique.

Quelques exemples :

- terre sèche: 900 - 2250 kJ/m³. °C ;
- béton cellulaire: 1000 kJ/m³. °C ;
- briques de terre cuite: 600 - 900 kJ/m³. °C ;
- béton ordinaire: 1100 kJ/m³. °C.

« Les matériaux dont le S varie entre 400 et 1000 kJ/m³.°C sont bons pour les parois extérieures, mais ils ne peuvent stocker la chaleur ». En-deçà de ces valeurs, ce sont des matériaux isolants ; au-delà, les matériaux emmagasinent efficacement la chaleur.

(Loréa, 2014)

I.4.6. L'effusivité thermique Ef

L'effusivité mesure la vitesse à laquelle se réchauffe (ou se refroidit) la température superficielle d'un matériau. Elle mesure, pour une surface d'1m² du matériau, le nombre de KJ qui ont pénétré 1 seconde après avoir été mise en contact avec une autre surface plus chaude d'1°C. $E_f = \sqrt{S \cdot \lambda}$.

Les matériaux ayant une faible effusivité donnent une impression de chaleur quand on s'en approche car son effusivité se rapproche de celle du corps humain (400 J.m⁻².K⁻¹ .S^{-1/2}). Ils demandent un faible flux de chaleur sur un court temps de contact pour avoir une sensation de confort.

L'effusivité se mesure en KJ:m².s exp ½.

Quelques exemples :

- terre sèche: 1000 KJ:m².s exp ½ ;
- béton cellulaire: 237 - 429 KJ:m².s exp ½ ;
- briques de terre cuite: 480 - 1300 KJ:m².s exp ½ ;
- béton ordinaire: 1960 - 2350 KJ:m².s exp ½. (Loréa, 2014)

I.4.7. Le déphasage thermique

Le déphasage thermique est la capacité qu'a un matériau à ralentir les transferts de chaleur.

Il permet de différer et de lisser les écarts de température. Il est ainsi lié à l'inertie thermique du matériau. En été, il permet notamment de limiter les surchauffes lors de pics de température. Le déphasage dépend de l'épaisseur de la paroi. Ainsi, pour obtenir une base de comparaison, j'ai utilisé le logiciel de calcul du groupe « cd2e » qui réalise automatiquement les calculs de déphasage sur base d'une banque de données. (Loréa, 2014)

- terre sèche : 6,172 h ;
- béton cellulaire : 8,438 h ;
- brique de terre cuite : 6,25 h ;
- béton : 6,365 h.

I.4.8. Le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ

« Ce coefficient décrit la manière dont les matériaux de construction permettent des échanges de gaz, de liquide et de particules solides entre les deux faces d'un mur. Il s'agit de mouvements moléculaires qui provoquent des micro-transferts jusqu'à ce qu'une densité uniforme du gaz ou du liquide soit atteinte. La diffusion de la vapeur d'eau varie selon le type de porosité du matériau : plus il y a de pores 'ouvertes', plus la résistance de diffusion à la vapeur d'eau sera faible ». La valeur μ définit la difficulté qu'a l'air de traverser un matériau. Ainsi, « une valeur μ de 5 indique que l'air traverse 5 fois plus difficilement ce matériau que l'air ». Dans certains cas, la valeur est différente selon que le matériau est sec ou humide La comparaison ci-dessous est établie sur base de matériaux de gros œuvre d'une masse volumique similaire :

- terre crue (2200kg/m³) : 5 (sec) /10 (humide) ;
- béton cellulaire (1300kg/m³) : 7,5 – 9 ;
- brique de terre cuite (2100kg/m³) : 31 ;
- béton plein lourd (2300kg/m³) : 135.

Il ressort de ces caractéristiques que la brique de terre crue laisse très bien passer la vapeur d'eau, ce qui en fait un matériau dit 'respirant'. (Loréa, 2014)

I.4.9. La capillarité

Cette caractéristique permet de déterminer, d'une part, la vitesse d'absorption d'eau du matériau, et d'autre part, la quantité que ce dernier peut en absorber. Ce phénomène «

permet de « transporter » à travers un mur des quantités d'eau beaucoup plus importantes que le phénomène de diffusion de vapeur d'eau ». Son efficacité sera d'autant meilleure que le réseau capillaire est fin, ce qui laisse supposer que la brique de terre crue est un matériau capillaire très efficace. Toutefois, le manque de données relatives à ce sujet ne permet pas d'établir de base de comparaison par rapport aux autres matériaux. (Loréa, 2014)

I.5. L'ARCHITECTURE DE TERRE :

I.5.1. Histoire

« Un matériau n'est pas intéressant pour ce qu'il est mais pour ce qu'il peut faire pour la société. », John FC TURNER

La construction en terre crue s'est déclinée au cours du temps en un grand nombre de modes d'utilisation. Chacun d'entre eux est associé à une culture, à un climat ou encore à des savoir-faire traditionnels. (Loréa, 2014)

On estime que près d'un tiers de la population mondiale vit dans une habitation en terre. Environ 50% de la population des pays en développement, et au moins 20% de la population urbaine vivent dans des maisons de terre [Houben, 1994]. Ci-après, une figure présente le patrimoine mondial en terre crue. Hélas, ce matériau a souffert au siècle dernier de l'industrialisation et de la perte des savoir-faire. Ceci est dû principalement à la fascination pour les matériaux modernes comme le béton, la brique et l'acier. De plus, le manque de normes internationales, pour évaluer ces différents produits, présente un obstacle important pour le développement de ce matériau écologique (Fgaier, 2013)

C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des civilisations les plus glorieuses de l'Antiquité.

Les trouvailles archéologiques de maintes contrées en témoignent. Les strates du temps n'ont pas pu effacer les preuves accumulées, tout juste dissimulées. L'époque actuelle soigne ses vestiges : les ruines sont révélées et relevées, classées, protégées et restaurées.

Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours.

La construction en terre fut indépendamment développée dans les principaux foyers connus de la civilisation dans les vallées inférieures du Tigre et de l'Euphrate, le long du Nil, sur les rives de l'Indu et du Huanghe. (HACHEM, 2017)



Figure . I 1: Architecture de terre dans le monde (J.PAULUS, 2015)

I.5.1.1. Antiquité

Selon l'Auroville Earth Institute, le bâtiment de terre le plus ancien encore debout aujourd'hui daterait d'environ 3300 ans. Il s'agit du Ramesseum en Egypte construit à Thèbes en face de Louxor, de l'autre côté du Nil. Actuellement en cours de rénovation, ses voûtes en berceau font partie des plus anciennes. Les briques constituant les voûtes et les murs sont de taille différente. Des matières comme du limon, sable, paille, tessons de céramique et petits galets entrent dans la composition de ces briques, mortiers et enduits, qui ont permis de traverser les âges. En effet, les ressources de la vallée du Nil sont plurielles : le Nil apporte le limon argileux et l'eau, les céréales fournissent la paille et le désert contient le sable. D'autres mastabas funéraires royaux ont été construits en briques moulées. La technique évolue ensuite vers des constructions en briques de terre recouvertes par de la pierre, matériau plus noble et d'éternité. L'architecture de terre est alors plutôt utilisée pour les bâtiments civils, de la maison populaire aux cités des grands rois.

En Mésopotamie, des constructions à nombreux étages appelés ziggourats ont été construits. La tour de Babel, appelée également ziggourat Etemenanki (maison du ciel et de

la Terre) a été construite vers -600 avant JC. Elle s'étale sur une base carrée de 90 mètres de côté et culmine à une altitude vertigineuse de 90 mètres sur 7 niveaux. Pour monter si haut avec de la terre crue, les babyloniens ont inventé la technique de la terre armée selon laquelle des roseaux torsadés sont insérés dans les parties centrales de briques de terre crue perforées. De l'asphalte et du bitume rentrent parfois dans la composition de ces constructions hors norme. Enfin, l'enceinte extérieure de la tour est protégée par une enveloppe de brique de terre cuite qui protège la terre crue des intempéries. D'autres techniques plus ou moins avancées se développent également en parallèle dans d'autres régions du monde comme en Extrême-Orient, en Europe ainsi qu'en Amérique. (D.Miraucourt, 2017)



Figure 1.2: Ziggourat de Babylone, ou tour de Babel (image réelle et virtuelle)

(D.Miraucourt, 2017)

I.5.1. 2.Moyen-âge

Même si les romains diffusent la technique de cuisson des briques et le blocage, les constructions rudimentaires faites de long bois fendus et torchis sont couramment employées au moyen-âge. Le

torchis est un mélange de terre et de paille qu'on applique sur une armature de branches. La construction à pans de bois associée au torchis apparaît donc progressivement et se développe avec l'art de la charpenterie qui permet de bâtir plus haut. Durant cette période, la terre crue est donc majoritaire, car elle est moins gourmande en énergie que la terre cuite et quatre fois moins onéreuse que la pierre pour une meilleure isolation.

A partir du XI^{ème} siècle, de somptueux édifices ont vu le jour avec l'influence de l'Islam. Le savoir-faire propre à l'architecture des mosquées a su traverser les siècles pour nous parvenir et a permis de construire relativement récemment des édifices religieux remarquables, comme la grande mosquée de Bobo-Dioulasso construite en 1882 au Burkina Faso.

Il faudra attendre le XIII^{ème} siècle pour voir réapparaître l'emploi de la terre crue massive que ce soit en bauge, en pisé ou en briques, comme à Grenade en Andalousie, avec les remparts massifs en terre crue de l'Alhambra, classés patrimoine mondial de l'UNESCO.

(D.Miraucourt, 2017)



Figure1.3 : Mosquée de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso (gauche) et Remparts massifs de l'Alhambra à Grenade (droite) (D.Miraucourt, 2017)

I.5.1.3. La renaissance

Au XVI^{ème} siècle, apparaissent les premiers gratte-ciels en briques de terre crue. Le but de ces cités-états est de densifier l'habitat en bâtissant sur plusieurs niveaux pour former des cités entières en terre massive, protégées ainsi des assaillants. Pour alléger les immeubles, les murs sont plus épais en bas qu'en haut et les ouvertures sont plus importantes en haut qu'en bas. Au Yémen, la cité Shibam compte des ensembles de huit étages jusqu'à 30 mètres, également classés patrimoine mondial de l'UNESCO (D.Miraucourt, 2017)



Figure I.4 : Le Manhattan du désert, à Shibam au Yémen (D.Miraucourt, 2017)

I.5.1.4. L'ère contemporaine

La construction en terre crue perdure alors jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle grâce à la simplicité et au faible coût de ce matériau local. Durant cette période, la technique de compactage fait son apparition suite à la nécessité d'améliorer la qualité des matériaux et la durabilité des bâtiments voulus par tout un chacun. La progression récente vers le bloc de terre comprimé (BTC) est une extension logique du développement de la brique de terre cuite suite à la révolution industrielle. En effet, la technique de compression de la BTC vient directement des industries des tuiles et briques de terre cuite. Après la deuxième guerre mondiale et plus tard pendant la crise du pétrole, la volonté d'économiser de l'énergie, cumulée aux problèmes d'alimentation en cas de pénurie d'énergie, ont été deux facteurs catalyseur du développement de la BTC encourageant même l'élargissement de son application architecturale dans des régions confrontées à des coûts énergétiques élevés.

Cependant, l'usage du béton, acier et verre vient largement concurrencer la construction en terre pour la rendre minoritaire dans les pays les plus développés. Plus récemment, les matériaux naturels retrouvent un regain d'intérêt dans la construction, grâce à la prise de conscience environnementale. La terre crue intéresse à nouveau car elle présente de nombreux avantages que ne présentent pas nos matériaux de constructions modernes

(recyclable, locale, non polluante, saine, naturelle, sans déchets, réparable, inertie et hygrométrie...) (D.Miracourt, 2017)



Figure I.5 : Centre de l'Architecture de Terre, Mali (J.PAULUS, 2015)

I.6. La construction en terre en Algérie :

En Algérie, les projets de construction réalisés n'ont aucune identité architecturale, ce qui est déjà publié sur le magazine de l'architecture en ligne Archi-Mag : « La question de l'architecture en Algérie, reste encore sans réponse près d'un demi-siècle après l'indépendance. En effet, les paysages urbains, les productions architecturales qu'elles soient de commande publique ou d'initiatives privées, témoignent d'une absence de repères historiques ou de leur méconnaissance. L'absence de ces repères qui seraient à même d'asseoir une permanence de signes identitaires architecturaux reconnaissables, ainsi que leur perpétuation, réduit les chances de jeter les bases d'une architecture algérienne contemporaine pouvant s'inscrire dans l'universalité et permettant son établissement en tant que style architectural propre au pays et de l'inscrire dans la durabilité.»

L'Algérie a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation des constructions en terre mais il reste insuffisant pour réduire ou même limiter l'obstacle psychologique des citoyens.

L'étude de la réhabilitation et la restauration de l'ancien hôpital d'Adrar, conçu en 1942 par Michel Luyckx, et classée en 2007 patrimoine local, présente un exemple sur l'importance de la construction en terre dans le sud algérien.

Dans ces trois dernières années, le Ministère de la Culture en collaboration avec l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger (EPAU), organisent un festival

international de promotion des architectures de terre, baptisé « ArchiTerre ». L'objectif premier de ce festival est la sensibilisation aux architectures de terre des futurs acteurs de la préservation du patrimoine et de la construction.

Le Décret exécutif n : 12-79 du 19 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 12 février 2012 portant création du Centre Algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre CAP Terre et fixant son organisation et son fonctionnement.

Le CNERIB, regroupe plusieurs projets réalisés en terre crue ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit: (Iamouri-Hannani, 2014)

Année	Réalisation
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadla à 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 Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à chéraga 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.

Tableau 1: les opérations de construction en terre en Algérie (Iamouri-Hannani, 2014)



Figure I.6 :logements en B.T.C à Tamanrasset (Le CNERIB)



Figure I.7: Prototype acheuvé (SAFIA, 2014)



Figure I.8:premières assises du prototype de Souidania 1999 (SAFIA, 2014)



Figure. I.9 : maison en pisé au village Madher à Boussada (SAFIA, 2014)

I.7. L'inter de la construction terre crue :(social et Environnement et Economique)

La terre crue fut la matière de base des constructions depuis l'antiquité, elle fut utilisée, pour la construction de la ville de (Jerico), au septième siècle Av_J.C pour la construction de la tour de Babylone sur une hauteur qui atteint neuf étages, elle fut donc utilisée à grande échelle, et le secret revient à son adaptation aux conditions économiques et climatiques.

La terre est une matière qu'on retrouve partout, son utilisation jusqu'à nos jours est acceptée, essentiellement dans les régions rurales.

L'architecture de terre peut offrir toute une gamme de produits architecturaux allant du logement social, collectif à l'habitat de haut standing, les œuvres, faites en terre, de Martin Rauch et de Sverre Fehn, donnent de meilleures exemples pour des populations aisées. L'expérience française à Mayotte, montre que l'architecture de terre donne un champ plus vaste au marché immobilier, et offre plus de possibilités aux promoteurs face au monopole des produits conventionnels. La variété des procédés de constructions en terre permet d'absorber le chômage, et ouvre ainsi un grand marché pour l'emploi qui assimile aussi bien une main d'œuvre peu qualifiée que des cadres de haut niveau.

Le maintien des populations rurales, dans leurs environnement, est un autre avantage de la revalorisation de l'architecture de terre, ainsi le matériau, terre, localement produit, favorise le développement économique local et devient un moyen de fixation des populations rurales tentées par la migration vers les grandes villes.

La qualité d'isolation de la terre permet d'économiser de l'énergie, en effet un gain en énergie allant de 50% à 90% pour une couche d'argile expansée couverte de 40 cm de terre gazonnée comparé à l'isolation classique des toitures. Le matériau terre permet aussi de préserver l'environnement. Les constructions en terre crue produisent très peu de pollution pendant leur cycle de vie, le matériau ne demande que très peu de traitements. En l'occurrence le matériau peut très bien être réutilisé (recyclé) ou revenir à son état initial, contrairement à la plus part des matériaux industrialisés qui sont très polluants.

Sur le plan santé la terre, comme matériau de construction, peut avoir des retombées bénéfiques, en assurant une bonne qualité de l'atmosphère intérieure par la régulation de l'humidité relative. En effet la terre peut absorber jusqu'à 3% de son poids en vapeur d'eau et peut la restituer en cas d'assèchement de l'air environnant.

La revalorisation de l'architecture de terre relance la relation entre l'homme et son environnement architectural représenté par les volumes, les formes, les arts et le patrimoine issue de son échelle humaine.

Le but général nous conduit à réfléchir de nouveau afin de fonder des bases et règles d'une architecture qui se marie harmonieusement avec son l'environnement, le patrimoine

et l'homme, dans une époque où la nature perd son équilibre et l'explosion démographique devient inquiétante. L'architecte est invité à jouer son rôle d'innovateur afin d'éviter et amortir la catastrophe. (Tahar, 2009)

I.8. Les avantages et les inconvénients des constructions en terre :

I.8.1. Avantages des architectes de terre crue :

Universalité et originalité des architectes en terre : l'architecte de terre recouvre une large aire géographique importante dans le monde, l'homme a su siècles durant, adapter le matériau " terre selon la région climatique, et géographique et ses conditions socioéconomique. La synthèse de l'esprit et de matière a produit des ensembles architecturaux d'une grande diversité ils sont issus d'un savoir-faire artisanal et de l'heureuse alliance de l'imagination du peuple et des exigences du paysage, et s'exprimant à travers toutes sortes de formes et des décorations.

Selon Repiquent (2006) la construction en terre n'est pas réservée au pays du tiers monde, ni l'architecte vernaculaire. La modestie du matériau n'a pas empêché son utilisation pour la construction des immeubles urbains à la fin du XVII^e siècle, le lyonnais François Coignet aux débuts du XIX^e siècle dessine des édifices publics, immeubles urbains demeures bourgeoises adaptés au matériau terre. Ses ouvrages traduits dans différentes langues font passer la construction en terre dans le champ de l'architecte savant. (SAFIA, 2014)

I.8.1.2 Avantages pour l'environnement :

- La terre non cuite ne contribue pas à la déforestation grâce à l'utilisation de ressources biologiques pour la cuisson des matériaux.
- Elle ne consomme aucune énergie non renouvelable comme le pétrole et le gaz, que ce soit au traitement et à la fabrication d'origine des matériaux; ou dans l'application, contrairement à la fabrication du ciment, de la chaux et d'autres matériaux liants conventionnels.
- L'exploitation de la strate à même les chantiers permet une économie d'énergie énorme de transport de matériaux. Cela ne contribue pas à la dégradation du paysage, contrairement à l'extraction de minéraux et de minerais qui creuse collines et sites à ciel ouvert. Une grande quantité de terre extraite au cours de grands travaux d'utilité publique, comme les routes, peut être recyclée et utilisée pour la construction (ce qui permet une

Distribution décentralisée très facile).

- La terre ne contribue pas à la réduction de ressources en agrégat, tels les graviers et le sable qui sont extraits de carrières ou de cours d'eau dans des sites insulaires ou des lagons, mettant ainsi en péril la balance écologique de ces environnements naturels.
- La terre n'utilise que très peu d'eau, ressource essentielle pour la vie des populations.
- La terre ne produit aucun déchet industriel ou chimique et a en plus l'avantage d'être presque entièrement recyclable.
- Non seulement l'utilisation de la terre non cuite ne pollue pas, mais elle garantit aussi l'absence d'effets nocifs dans le cadre de la vie quotidienne, tels l'absence d'émissions gazeuses et d'autres produits chimiques toxiques, émissions radioactives etc.
- La texture de la surface, la couleur, la forme et la luminosité de la terre non cuite en fait un matériau attrayant pour bâtir sans détruire l'environnement naturel. (Tahar, 2009)

I.8.1.3. Avantages Economiques :

- Elle permet la réduction de la fuite des devises par une substitution aux matériaux importés (ciment, acier, bois).
- Sa production manuelle est caractérisée par une Haute Intensité de Main d'œuvre (HIMO), ce qui favorise l'économie locale, la création d'emplois et participe concrètement à la lutte contre la pauvreté. (OUSSAMA, 2018)

I.8.1.4. Avantages Sociétaux :

- Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire ancestral
- Elle permet de répondre à la demande d'habitat dans les pays du Sud et de lutter contre la précarité des populations. (OUSSAMA, 2018)

I.8.2. Les inconvénients des architectes de terre crue :

Malgré tous les avantages du matériau terre nous ne pouvons pas éliminer

Quelques points négatifs tels que :

- La facilité de son érosion sous l'action de l'eau, ce qui rend son emploi délicat dans les régions de forte pluviométrie ;
- Le matériau terre ne possède aucune adhérence avec le bois, qui provoque des décollements autour des ouvertures ;
- En l'utilisant en couverture, il peut prendre de l'eau, s'alourdir et engendrer des affaissements.

- La liaison entre les particules est d'ordre physique, en contact avec l'eau elles se fragilisent et même se neutralisent ce qui détériore le matériau et diminue sensiblement ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité dans le temps.

- Il ne résiste pas à la flexion et à la traction ; en ajoutant de la paille il peut présenter une résistance deux fois mais elle reste faible. (Iamouri-Hannani, 2014)

I.9.LES DIFFERENTS TYPES DE CONSTRUCTION EN TERRE :

Il existe plusieurs possibilités de constructions en terre. On dénombre 12 techniques radicalement différentes mais il existerait plus d'une centaine de variantes employées en fonction de paramètres comme le type de terre disponible, l'usage voulu, le climat etc.

Toutes

Ces techniques n'ont pas connu le même succès et ne sont pas toutes utilisées dans la même mesure:

Parmi celles-ci, on distingue le pisé, l'adobe et les briques comprimées (BTC) qui sont majoritaires. (Tahm & Aahmed, 2019)

I.9.1.L'adobe :

-I.9.1.1.Définition : L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de paille hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol. La brique d'adobe peut varier d'une dimension de (15x25x10) cm soit (30x60x10) cm.

Chaque élément du mélange joue son rôle. *Le sable : réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, *l'argile : agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexibilité. (HAMZA A. Z., 2017)



Figure I. 10 (a), (b) maison traditionnelle en adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye
(Oussama, 2018)



Figure I.11 :Mur extérieur en adobe(terre crue) (Tahar, 2009)

I.9.1.2.La production :

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction. (HAMZA A. Z., 2017)

I.9.1.3. Modes de production de l'adobe :

On distingue deux principaux modes de production des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé. (HAMZA A. Z., 2017)



Figure I.12:Le démoulage des briques d'adobe manuel. (lamouri-Hannani, 2014)

I.9.1.4. Les produits :

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée.

I.9.1.5 Les avantages de l'adobe :

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

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- D'emmagasiner la chaleur.
- Réduire la consommation d'énergie.
- De ne produire virtuellement aucune pollution.
- Construction peu coûteux.
- N'entraîne pas la production de gaz . (HAMZA A. Z., 2017)

I.9.1.5. Les inconvénients de l'adobe :

- Fragile.
- Nécessite des travaux d'entretien. (lamouri-Hannani, 2014)

I.9.2. Le pisé :

I.9.2.1. définition :

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes

Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée. (Figure 13) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé. (HAMZA A. Z., 2017)

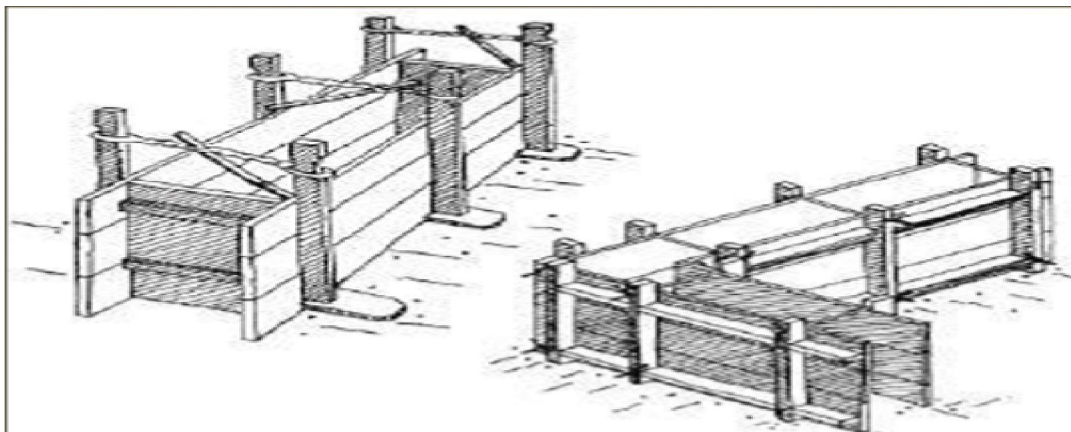


Figure I.13. :coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé (HAMZA A. Z., 2017)

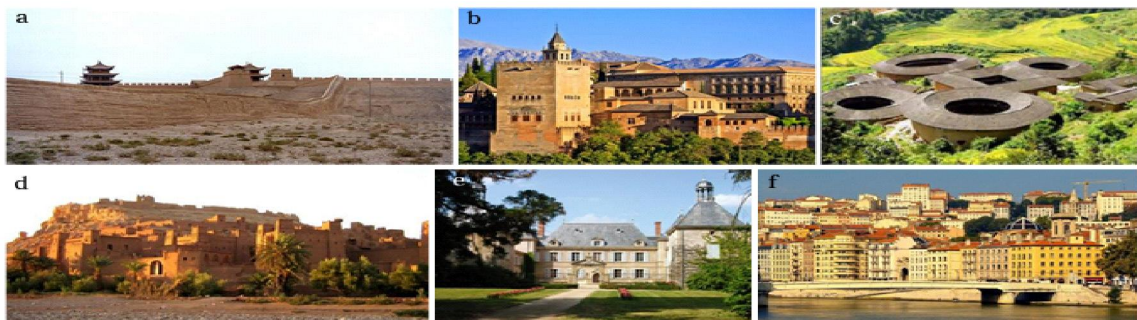


Fig I .14.patrimoine en pisé (Paulus, 2015)

I.9.2.2. Technique de production:

Le pisé est une technique particulière pour monter un mur en terre crue : celle-ci est compactée (à l'aide d'un pilon) dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs (figure 1.15). Cette technique permet d'utiliser la terre généralement directement issue du site de la construction, et ne nécessite pas de transformation (pas d'utilisation d'énergie pour altérer ses propriétés basiques). Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchées » (hauteur de coffrage). En revanche, cette technique n'est pas applicable avec toutes les terres. En effet, la terre à pisé doit avoir une granulométrie variée ; graviers, sables, limons et argiles dans des proportions bien définies, même si selon les lieux d'extraction, la matière se comportera différemment (couleur, tenue aux intempéries,...).

(HAMZA A. Z., 2017)

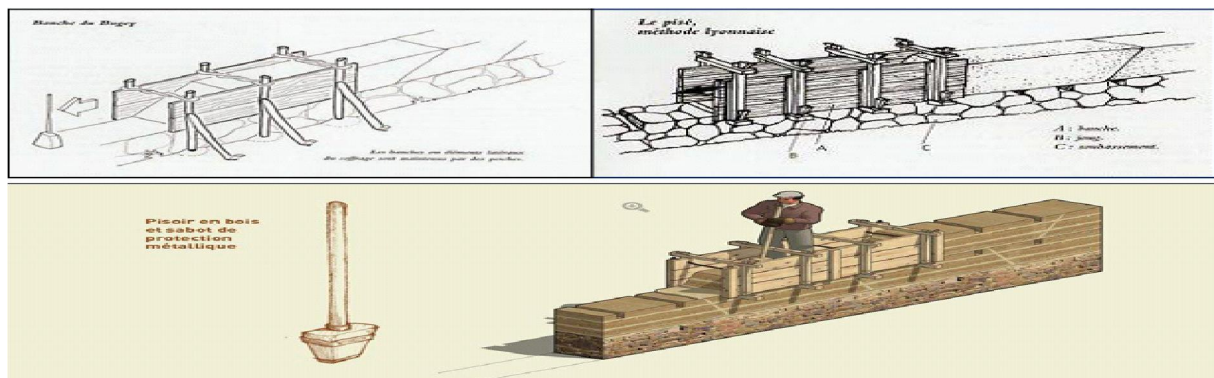


Figure I.15 : construction un mur en pisé (HAMZA A. Z., 2017)

I.9.2.3. Les produits (différents types de pisé) :

L'aspect général du matériau pisé, une fois compacté et décoffré est celui d'un "béton maigre de terre", variable selon le type de terre (apparence de graviers et cailloux ou texture plus fine), selon le type de coffrage utilisé et les principes constructifs adoptés pour édifier la maçonnerie de terre en "banchées" successives (en progression horizontale ou verticale avec des coffrages traditionnels). (HAMZA A. Z., 2017)

I.9.2.4. Les Avantages de pisé :

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

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).

- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité à stocker la chaleur et à la restituer par rayonnement. Isolation phonique et qualité acoustique.
- Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire. (HAMZA A. Z., 2017)

I.9.2.4. Les inconvénients de pisé:

- Travaux d'entretien annuels. (Hachem, 2017)

I.9.3. La bauge (terre-paille):

I.9.3.1. Définition : Un mur de bauge se façonne en déposant de la terre crue mêlée à de la paille, cette

- Dernière permettant d'améliorer sa cohésion et sa résistance. C'est un mur porteur. (Hachem, 2017)

I.9.3.2. Technique de constructions :

Piqueter la surface du mur (extérieure), incrusté des éclats de pierre, permettra une meilleure adhérence de l'enduit. (Hachem, 2017)

I.9.3.3. Avantage:

- Qualité plastique du matériau
- Pas besoin de coffrage (pisé), ni d'armature (torchis) (Hachem, 2017)

I.9.3.4. Inconvénients:

- Nécessite beaucoup de main d'œuvre - Installation des murs très longue. (Hachem, 2017)

I.9.4. Le torchis:

I.9.4.1. Définition : C'est un mélange terre-paille ou terre-chanvre coulé entre des banches. La pâte obtenue doit être montée entre les éléments d'une structure en bois ou en brique (à la main ou à la truelle) et doté d'une armature interne (planchettes, branches). (Hachem, 2017)

I.9.4.2. Technique de constructions:

- Pour fabriquer des grandes quantités de torchis, utilisez une bétonneuse. On fait d'abord un mélange argile + eau pour obtenir une bouillie liquide, on ajoute ensuite de la paille ou du chanvre afin de ramollir le tout, puis de la terre et de la chaux pour le durcissement.

- Il est préférable de consolider l'assise du mur notamment pour limiter les infiltrations : installez donc des pierres, galets, ou morceaux de briques dans la partie basse. (Hachem, 2017)

I.9.4.3. Avantage:

- Plus solide que la terre crue seule
- Séchage rapide
- Financièrement plus économe que les autres types de terre crue (Hachem, 2017)

I.9.4.4. Inconvénients:

- Le chantier peut demander plus d'efforts qui sont proportionnels à la taille du projet.
- Les normes de construction n'ayant pas encore été établies. (Hachem, 2017)



(a) Mélange du torchis

(b) Maison en torchis (AsTerre)

Fig. I.16: Construction en torchis (Sources Internet)

I.10. CONCLUSION :

Le but de cette étude biographique est de connaître les différents types de briques de terre et les méthodes de fabrication, ainsi que leurs évolutions dans l'histoire de la construction, et de connaître l'effet des stabilisants, du rapport eau et humidité sur la durabilité.

Grâce à cette étude, nous avons remarqué qu'aucun élément constitutif ne peut offrir le choix optimal du point de vue de la résistance mécanique, de l'isolation acoustique et de la durabilité.

La terre est considérée comme un matériau environnemental par excellence en raison de son très large mérite.

CHAPITRE II :
BLOCS DE TERRE COMPRIMEE

II.1.Introduction :

La technique de la brique de terre comprimée (BTC) offre aux constructions une certaine durabilité par rapport à la technique d'adobe. Aujourd'hui plusieurs études s'intéressent à étudier les propriétés mécaniques et durabilité du matériau terre. Afin d'atteindre ces performances, le matériau terre a été traité par des différentes additives. De ce fait, la compréhension des phénomènes liés aux processus physico-chimiques des réactions entre ces additives avec les composantes de la terre permettent de mettre en évidence le rôle de chacun de ces additives. Ainsi, les cinétiques des réactions chimiques.

II.2.Blocs de terre comprimée :

II.2.1.Définition :

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont une forme relativement nouvelle d'unités de maçonnerie en terre qui combinent le sol local, le stabilisant et l'eau sous pression pour former un bloc de terre. En utilisant le sol, une ressource facilement abondante presque partout dans le monde, en tant que composant principal de la production de blocs, les BTC offrent une alternative durable aux unités de maçonnerie traditionnelles. L'Col est mélangé avec un stabilisant, généralement du ciment Portland ou de la chaux hydratée, pour ajouter de la cohésion et augmenter la résistance aux intempéries. Selon le type de sol utilisé, du sable est parfois ajouté pour agir comme un agrégat. De l'eau est ajouté pour activer le stabilisateur, et le mélange est comprimé à la machine pour se former et laissé durcir pendant une période de 28 jours. Contrairement à de nombreux autres éléments de maçonnerie, les BTC ne sont ni cuits ni cuits pour atteindre la résistance finale. (D.Sitton, Zeinali, H.Heidarian, & A.STORY, 2018)

II.2.2. Processus de production des BTC :

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits pas compactage, exception faite de la phase de cuisson.

Les étapes essentielles de la production du BTC sont les suivantes:(figure :I I.1) (HAMZA A. Z., 2017)

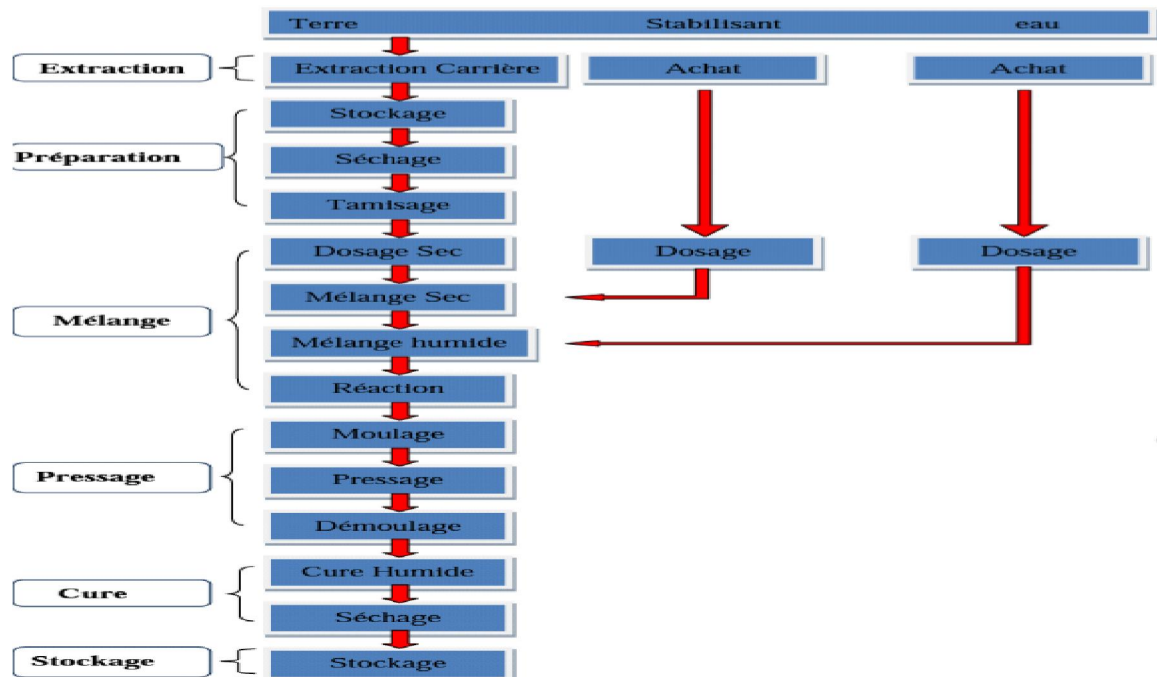


Fig II.1: :cycle de production BTC (HAMZA A. Z., 2017)

L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique (HAMZA A. Z., 2017)

II.2.3. Les Avantages de bloc de terre comprimée

- La BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- La BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de part son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique
- La BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm^2)
- La BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- La BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé.

- Les règles de construction sont simples à suivre (Soumaia, 2015)

II.2.4.Inconvénients :

- Fabrication des briques longue et fatigante
- Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite
- Se détériore sous l'effet du gel . (Hachem, 2017)

II.2.5.Les utilisations de la brique de terre compressée

Nous évoquerons ici les principales applications pour lesquelles l'utilisation de la

BTC peut être envisagée. Renseignez vous auprès d'un technicien de la construction ou d'un architecte avant d'utiliser de la BTC pour d'autres usages. (Stagiaire, 2011)

- **Mur porteur :**

- En mur porteur la BTC doit être utilisée au moins en double parement. Vous trouverez ci-dessous l'essentiel des règles de montage de la BTC en mur porteur.
- Les avantages de la BTC en mur porteur sont ses qualités esthétiques, son inertie thermique, qui lui permet de réguler la température intérieure et ses caractéristiques hygrométriques qui assurent une constance du taux d'humidité (Stagiaire, 2011)

- **Cloison :**

- La BTC se prête bien à la réalisation de cloisons séparatives où sont appréciées en
- plus des avantages déjà cités, ses qualités d'isolant phonique qui permettent un certain confort d'utilisation des locaux ainsi cloisonnés.
- Attention : pour les pièces humides il est impératif d'observer certaines précautions

(cf. infra). (Stagiaire, 2011)

- **Contre cloison :**

- La BTC peut être utilisée pour constituer une paroi isolante (avec ou sans matériau d'isolation intermédiaire) d'un mur porteur. Outre l'aspect isolant,

un effet esthétique et de régulation de l'hygrométrie peut aussi être recherché. (Stagiaire, 2011)

- **Mur capteur :**
- Le rôle d'un mur capteur est d'emmagasiner la chaleur des rayons solaires et de la restituer à l'intérieur d'un bâtiment. De par sa forte inertie thermique, un mur en BTC se prête bien à cet usage. A contrario, si ce n'est pas l'effet recherché, il faudra se prémunir de cet effet par des dispositions architecturales ou techniques (Stagiaire, 2011)
- **Mur trombe :**
- Le mur Trombe (du nom de son inventeur) est un mur capteur dont le rendement est amélioré par un effet de serre qui est créé devant le mur par la mise en place d'une paroi vitrée devant le mur. Des ouvertures hautes et basses dans le mur permettent à la lame d'air réchauffée de circuler et de réchauffer le local derrière le mur. (Stagiaire, 2011)

II.3.Pathologies des constructions :

Les constructions en briques de terre crue sont l'objet de plusieurs problèmes, Détériorations et désordres, qui sont dus dans la plupart des cas a leurs sensibilités a l'eau. Pour faire une étude pathologique, il faut observer et analyser les symptômes, puis établir un diagnostic sur les causes et le risque d'évolution des désordres, et enfin chercher le traitement adéquat. A ce sujet le CRATerre, définit deux types de pathologies : celles dites « pathologies humides » dues aux ruissellements d'eaux et a l'humidité, et les « pathologies structurelles » dues aux mouvements différentiels des fondations, aux surcharges, etc. engendrant des fissures de différentes importances dans les briques.

Nous allons consacrer ce chapitre a la présentation des pathologies des constructions en terre crue d'une façon générale, et des constructions ksouriennes au particulier, avec ses causes, ses conséquences, et son entretien si possible.

II .3.1.Les principaux lieux et causes de désordres :

➤ Les principaux lieux de désordres :

Pour mieux profiter des avantages des constructions en briques de terre crue, il est important de connaître leurs performances, afin de les prévenir de certaines pathologies. Ces dernières sont généralement localisées:

- A la base des murs, a cause de la remontée capillaire, l'eau d'arrosage, ... ;
- Aux bords supérieurs des murs, a cause des eaux de pluie et de rejaillissement ;
- A des endroits précis tels que les ouvertures.

➤ **Les principales causes de désordres :**

Les systèmes constructifs en briques de terre crue ne résistent qu'aux efforts de compression, ce qui oblige à éviter leur exposition aux efforts de traction et de flexion, et plusieurs d'autres causes de désordres qui sont :

- Les fortes pathologies humides telles que : les eaux de pluie, de ruissellement, la remontée capillaire, etc ;
- Mauvais choix du terrain de construction tels que : les terrains gonflants, de faible résistance, instables, etc.
- La mauvaise conception et réalisation des bâtiments : sous dimensionnement et excentricité des fondations, murs trop percés d'ouvertures, charges trop élevées non reprises par les chaînages, mauvais choix de terre, adobes mal appareillées, mauvais ancrage des poutres de planchers dans les murs, etc.
- L'action du vent et les objets qui sont transportés sur le haut et le bas des murs ;

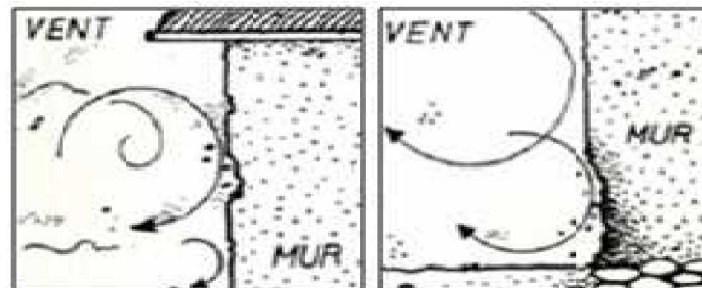


Figure II.2: L'action du vent en haut et bas d'un mur en adobe. (lamouri-Hannani, 2014)

Pathologies humides des constructions en brique de terre crue :

Comme son nom l'indique, elles sont liées à l'action de l'eau, et dues soit à l'exposition d'une surface du bâtiment à l'action d'eau, ou à l'existence des ouvertures (fenêtres, fissures) dans cette dernière, qui permet l'infiltration des eaux, ou bien la présence d'une force de pression ou capillaire qui fait pénétrer l'eau à l'intérieur du bâtiment. (lamouri-Hannani, 2014)

II.3.2. Les différents types humides :

Nous distinguons quatre types d'humidité :

➤ **Humidité ascensionnelle ou remontée capillaire:**

Elle est due à l'effet de la remontée capillaire, et parfois à cause des fuites de canalisations. Donc, l'humidité pénètre et remonte à l'intérieur de mur par l'effet de capillarité. La remontée capillaire se fait de bas en haut, du froid vers le chaud, et se manifeste dans les murs dont le pourcentage de porosité est très élevé. Elle se fait d'autant mieux que les pores des matériaux constitutifs du mur sont nombreux, minces et communiquent entre eux.

➤ **Les infiltrations des eaux de pluie :**

Elles sont dues aux fissurations, aux dégradations de mortier des joints et des enduits, etc. Ce type est très remarquable dans les façades à enduit fissuré imperméable exposées directement à la pluie.

➤ **Humidité de condensation :**

On peut la trouver dans les locaux non ventilés, soit superficielle sous forme de gouttelettes sur la surface interne des murs, soit interne dans l'épaisseur même du mur lorsque la vapeur d'eau atteint son point de condensation à l'intérieur des parois.

➤ **Humidité d'origine accidentelle :**

Elle est due aux infiltrations d'eau accidentelles. (Iamouri-Hannani, 2014)

II.3.3. Les pathologies liées à l'humidité :

: Elles sont groupées en quatre catégories en fonction du rôle de l'humidité, ainsi nous distinguons les altérations suivantes

➤ **Les altérations liées à l'action propre de l'humidité :**

Lorsque la vapeur d'eau ou l'eau liquide se transfère à travers les parois, leurs propriétés physiques subissent des modifications. Ces modifications peuvent se présenter dans la variation des dimensions lorsque l'eau et la vapeur d'eau remplissent les vides, jusqu'à la diminution de la résistance mécanique à la compression.

Cette résistance est dépendante de la teneur en eau des matériaux. Plus le taux d'humidité augmente plus la résistance mécanique diminue. Beck Kevin90 montre suite à des expériences que la résistance à la compression diminue de 55% entre l'état sec à l'état de saturation. L'explication de ce phénomène donnée par R. Colombe est la suivante :

«Lorsqu'on exerce une compression sur un matériau humide, l'eau tend à s'en échapper, développant ainsi une pression qui s'ajoute à la contrainte exercée sur le matériau diminuant ainsi sa contrainte de compression admissible, causant la rupture du matériau. »

-le gel dégel des matériaux :

Lorsque l'eau présente dans les vides se transforme en glace, celle-ci va exercer des pressions sur les autres pores provoquant la destruction et l'éclatement du mur en briques.

(lamouri-Hannani, 2014)



Figure II.3: Fléchissement d'un plancher. (lamouri-Hannani, 2014)

II.3.4. Les pathologies structurelles :

CRATerre identifie cinq types de pathologies, elles sont typiquement identifiées par l'apparition de fissures ou de décomposition du matériau, elles peuvent aller à partir de l'apparition de simples fissurations, puis des bombements (ventres), des écartements, de faux aplombs, jusqu'à engendrer à long terme, un déséquilibre causant l'effondrement des constructions.

Les fissures sont les manifestations principales des désordres causés par les contraintes localisées (poinçonnement, flambement, effondrement) ou encore la décomposition du matériau sous l'action de l'eau et de l'humidité.

- **Les fissures** : Elles sont souvent le résultat des erreurs constructives ou des modifications ultérieurs. La forte compression, due aux surcharges propre ou à l'exploitation, peut mettre le matériau en situation de dépassement de contrainte mécanique. Cette forte sollicitation

qui est soit localisée (ouvertures, planchers) ou exercée sur la masse, (mauvaise fondation et tassement différentiel) crée des fissures qui peuvent favoriser l'infiltration de l'eau voir déstabiliser le bâtiment.

- **Les fissures de retrait** : Elles sont dues au mauvais contrôle de qualité de la terre employée et de la teneur en eau lors de la mise en œuvre.
- **Les flambements** : Un mur élancé non chiné ou une charge importante, peuvent induire des déformations structurelles, les flambements ou ventres extérieurs provoquent alors des fissurations.
- **Les effondrements** : Ils peuvent être partiels ou totaux et sont induits par l'application de contraintes occasionnelles ou accidentelles ou bien le résultat d'une pathologie humide.
- **La décomposition du matériau** : la structure minéralogiques physico-chimique du matériau peut évoluer et se désagréger sous l'action de l'eau, du gel et dégel cyclique et de la forte chaleur. Cette pathologie est accélérée par la fixation des sels et des parasites organiques.

La maîtrise des performances du matériau terre et de ses techniques constructives permet aussi de surmonter certains de ses inconvénients structureaux, il faut signaler que l'entretien des enduits extérieurs est essentiel, car lorsqu'ils se désagrègent, la maçonnerie de terre crue subit directement l'attaque des eaux pluviales, qui altèrent les joints puis les briques elles-mêmes (Ep & SALIMA, 2012)

II.4.Le point faible de la construction en terre :

Le point faible de la construction en terre crue est sa grande sensibilité à l'humidité et à l'eau. Ce qui ne réserve cependant pas l'utilisation de la terre crue aux régions sèches, il « suffit » de prendre les dispositions constructives pour palier à l'action érosive de l'eau . (Stagiaire, 2011)

II.5.Les points forts de la construction en terre

- Matériau souvent disponible à proximité des lieux d'utilisation
- Matériau assurant une bonne inertie thermique source de confort

- Matériau recyclable
- Matériau peu consommateur de liant (donc économique) (Stagiaire, 2011)

II.6. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de terre :

II.6.1. Stabilisation :

C'est un ensemble de procédés permettant une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la durabilité de la terre. Elle doit permettre :

- la réduction de la porosité.
- la diminution du retrait et gonflement.
- l'obtention d'une meilleure cohésion.
- l'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface.
- l'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement. (OURADA, 2016)

Il existe trois processus de stabilisation des sols: la stabilisation mécanique, la stabilisation physique, la stabilisation chimique (Taallah & Guttala, 2016).

II.6.1.1. Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure. (Bachire, 2014).

II.6.1.2. Stabilisation chimique :

La stabilisation chimique modifie les propriétés d'une brique de terre par l'intermédiaire de certains adjuvants. Afin de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de produits (liants hydrauliques par exemple), rendant les sols traités moins hydrophiles. L'adjonction du ciment qui est un liant hydraulique permet lier les grains de sable tout en stabilisant l'argile de terre. On obtient ainsi une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la sensibilité à l'eau. Il faudra veiller à ce que l'eau de gâchage ne contienne ni de matières organiques, ni de sulfates. D'après Remillon cité par Otto (1987), la technique anglaise estime que tous les sols sont utilisables, sauf ceux dont la nature est trop plastique, c'est-à-dire ceux dont l'indice de plasticité est supérieur à 20 % et ceux contenant des sulfates nuisibles au ciment ou des matières organiques. (Meukam, 2004)

II.6.1.3. Stabilisation physique :

La stabilisation physique modifie les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit à diminuer l'indice de plasticité de matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion. Sikali cité par Ottou (1987) a étudié la stabilisation granulaire d'une latérite par ajout de gravillons concassés. Il a constaté que pour un pourcentage optimum du matériau d'apport, la portance du matériau étudié s'améliore considérablement. (Meukam, 2004)

II.6.1.4. La stabilisation physico-chimique :

Elle permet d'améliorer la résistance à l'eau et la résistance à la compression des briques. Il existe un grand nombre de produits stabilisants, pouvant être employés autant dans la masse que sur la surface des parois. Je restreindrai cependant leur étude aux produits les plus courants: le ciment, la chaux et le bitume (pour les adobes). Chacun d'eux fonctionne avec une variété de terre spécifique. En effet, on ne peut pas utiliser l'un ou l'autre stabilisant sans connaître le type de terre que l'on utilise. La stabilisation risque d'être moins efficace ou peut réduire les performances de la terre.

La stabilisation devient nécessaire lorsque l'ouvrage est exposé aux intempéries. A contrario, cette stabilisation ne l'est pas lorsque l'ouvrage est à l'abri de l'eau. Toutefois, dans nos régions, afin d'éviter l'effondrement des murs lors d'éventuelles inondations, il peut être intéressant d'utiliser, en plus d'une coupure capillaire, des briques stabilisées sur les premières lignes. (Loréa, 2014)

II.6.1.5. La stabilisation au ciment :

Le ciment permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre, et plus particulièrement sa résistance à l'eau. Il crée des liens irréversibles entre les gros éléments de la terre: les sables et les graviers. Ainsi, les résultats obtenus pour une stabilisation au ciment sont meilleurs pour une terre sableuse que pour une terre argilo-limoneuse. Si la présence d'une trop grande quantité d'argile peut être néfaste pour la qualité de la stabilisation, la terre doit néanmoins comporter au minimum 10 % d'argile pour donner une certaine cohésion à la brique après son démoulage, jusqu'à la prise du ciment. Les terres trop chargées en matières organiques ou en sels sont par contre proscrites. Les liaisons

créées ne sont pas -ou très peu altérées par l'action de l'eau. La brique garde les caractéristiques que le compactage lui a données. (Loréa, 2014)

II.6.1.6.La stabilisation à la chaux :

La chaux, contrairement au ciment, est plus efficace quand elle est intégrée dans une terre argileuse. Les argiles prennent une structure floclée. Les ions calcium contenus dans la chaux sont échangés avec les ions métalliques des argiles. Des liaisons très solides, comparables à celles du ciment, sont créées en désorganisant l'intérieur même des feuillets d'argile et en recréant d'autres liaisons plus stables entre les grains. Le temps d'attente avant que ce phénomène n'arrive à son terme est d'une quinzaine de jours; durée pendant laquelle les briques devront être stockées.

Pour stabiliser une terre, la teneur optimale en chaux est située entre 6 et 12 % mais varie d'une terre à l'autre.

Dans les chaux utilisables pour la stabilisation des terres, on peut distinguer deux grandes familles: les chaux aériennes sont les plus utilisées pour la stabilisation. Il faut distinguer deux types de chaux:

- La chaux vive réagit très fort avec les terres argileuses ayant une teneur en eau relativement élevée. Elle est peu utilisée pour la stabilisation. Son emploi est limité par un stockage et une manipulation délicats.
- La chaux vive est très avide d'eau et s'échauffe violemment à son contact. Elle doit être maintenue à l'abri de l'humidité jusqu'à son utilisation. « Elle est plutôt déconseillée pour la production de briques de terre crue qui demandent une teneur en eau assez faible et des terres plutôt sableuses ».
- La chaux hydratée, autrement dit éteinte, est produite en hydratant de la chaux vive. N'ayant plus les inconvénients de stockage et de manipulation liés à la chaux vive, elle est plus couramment utilisée en stabilisation.
- les chaux hydrauliques sont similaires au ciment. Elles sont très peu utilisées car l'emploi du ciment ou de la chaux aérienne est toujours préférable. (Loréa, 2014)

II.6.1.7.Stabilisation mixte chaux-ciment :

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques. On utilise d'abord la chaux seule à des faibles teneurs puis le ciment. Les deux liants ne sont pas

concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable donc plus apte à être mélangé ensuite au ciment. Le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grande que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement. Il n'existe pas à notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement. Apparemment, on peut penser que la pentlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et par la pentlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous (Oussama, 2018)

II.6.1.8. La stabilisation au bitume :

Elle consiste à imperméabiliser les particules d'argiles en les enveloppant d'un film imperméable. Dès qu'elles sont protégées, elles ne réagissent plus sous l'action de l'eau.

Les briques ne sont plus sujettes à des variations indésirables de volume.

« Le bitume utilisé pour la stabilisation est soit chauffé, soit mélangé à des solvants (bitumes fluidifiés), ou bien encore dispersé dans de l'eau (émulsion) ».

La stabilisation au bitume exige beaucoup d'eau. Cela limite alors son utilisation aux briques d'adobe et non aux briques de terre compressées puisque ces dernières nécessitent une faible quantité d'eau pour être produites. (Loréa, 2014)

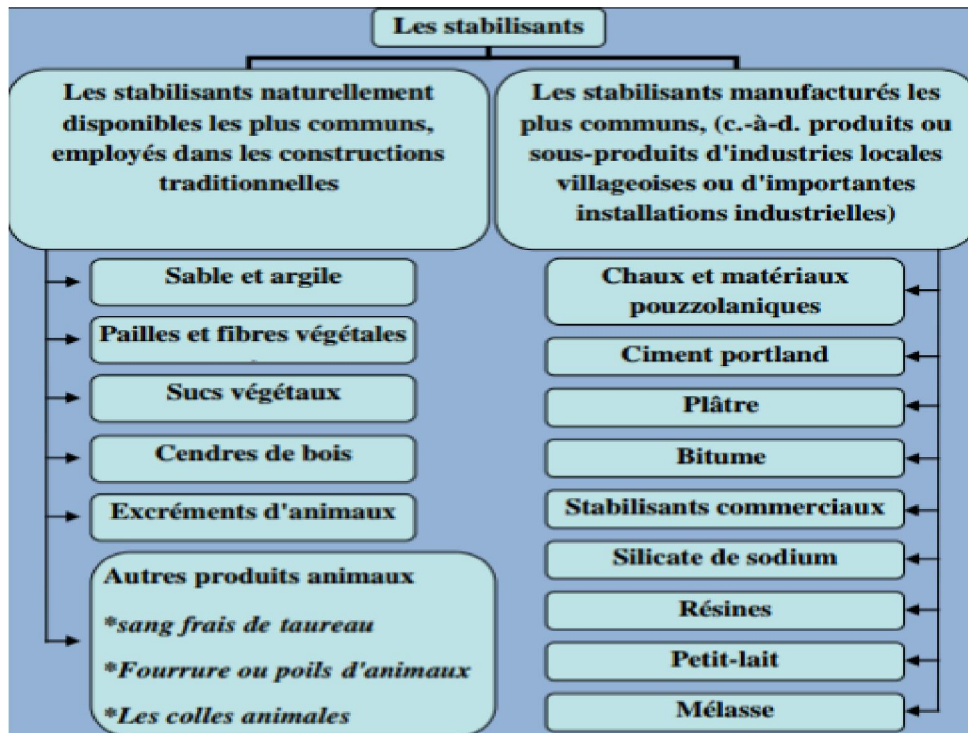


Figure II.4: types de stabilisants (HAMZA A. Z., 2017)

II.6.2.Moyens de stabilisation :

Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc. il y a six modes de stabilisations :

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

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (tableau 2) (Bachire, 2014).

Tableau II.1: Moyens de stabilisation des terres remaniées (Bachire, 2014)

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

II.6.3. Rôle de la stabilisation de la chaux :

La stabilisation est utilisée pour améliorer les propriétés des BTCS (Bell, 1993). La chaux est le matériau le plus ancien utilisé dans la stabilisation des sols. Lorsque la chaux est ajoutée au sol argileux, les propriétés du sol changent. Selon l'explication de Bell, lorsque l'ion calcium dans la chaux réagit avec le sol argileux, l'échange d'ions métalliques et de cations entre eux se produit. Par conséquent, les particules d'argile sont entourées d'une double couche hydratée diffuse. Cela provoque une altération de la densité de charge électrique autour des particules qui rend les particules se rapprochent et forment des troupeaux dans un processus appelé floculation. C'est la principale influence sur le changement propriétés techniques des sols argileux traités à la chaux.

Les anciens chercheurs ont utilisé différentes plages de pourcentages de chaux comme stabilisants. Alavez-Ramirez et al. Utilisé de la chaux seule, chaux combinée avec de la cendre de bagasse de canne à sucre (BCS) et du ciment seuls pour la stabilisation des BTCS. Le sol sablonneux a été utilisé pour Production BTCS. L'indice de plasticité et la limite liquide pour le sol étaient respectivement de 12% et 25,28%, et l'argile le pourcentage et le pourcentage de limon du sol étaient respectivement de 23,1 et 4,3. Alavez-Ramirez et al. atteint 28 jours sec résistances à la compression de 16,5 MPa avec 10% de chaux et 23,5 MPa avec 10% de ciment. Raheem et al. ont utilisé des échantillons de sol en latérite pour la

stabilisation de la chaux avec un pourcentage de chaux de 5% à 25% et la résistance à la compression la plus élevée atteinte sur 28 jours était de 1,25 MPa pour 10% de chaux. Guettala et al. a utilisé 8% de chaux comme stabilisant et a changé le pourcentage de sable entre 0 et 40%. Pour 40% de sable (argile 21,6%), une résistance à la compression sèche de 15 MPa et une résistance à la compression humide de 5 MPa ont été obtenues. Cloche a utilisé 0 à 10% de chaux comme stabilisant et a conclu que le pourcentage optimal de chaux variait entre 4% et 6%. Ngowi a utilisé un pourcentage de chaux de 0 à 15% comme stabilisant et a obtenu 15% comme pourcentage optimal. Akpokodje a utilisé différents types de sols avec différents pourcentages d'argile et de limon et utilisé de la chaux comme stabilisant. Le pourcentage de chaux était 0 à 12%, et les pourcentages optimaux de chaux pour les argiles et les limons de 41%, 85%, 64%, 30% et 29% étaient 10%, 12%, 6%, 12% et 12%, respectivement. Bogas et al. a indiqué à partir d'un examen de recherches antérieures que 6% à 12% de chaux est le pourcentage avantageux moyen. (S.N.Malkanthi, N.Balthazaar, & A.A.D.A.J.Perera, 2020)

II.6.4. Rôle de l'association de la chaux et du ciment comme stabilisants dans le BTCS :

La stabilisation combinée chaux-ciment peut être utilisée pour améliorer la résistance à long terme, ce qui ne peut être atteint avec du ciment ou de la chaux uniquement. Nagaraj et al. ont utilisé du ciment et de la chaux combinés comme stabilisants pour les BTCS. Les combinaisons utilisées étaient 6% de ciment: 2% de chaux et 4% de ciment: 4% de chaux. Une résistance élevée à long terme a été obtenue à la proportion de 4% de ciment: 4% de chaux. La combinaison de ciment et de chaux a été bénéfique car le ciment aide à stabiliser la portion de sable et la chaux aide à stabiliser la portion d'argile. Pour cette raison, la résistance et la durabilité peuvent être augmentées. Rahman et al. ont utilisé un sol argileux, un sol sableux et un mélange de sol argileux et sableux pour la préparation des blocs. Comme stabilisant, du ciment, de la chaux et une combinaison de chaux et de ciment ont été utilisés. Ils ont montré que l'argile et un sol sablonneux mélangé à une stabilisation de ciment a donné la résistance à la compression maximale par rapport à une autre stabilisation méthodes. Cependant, pour des raisons économiques, la combinaison de chaux et de ciment pour la stabilisation est meilleure que ciment seul. De nombreuses études ont été menées avec différents stabilisants pour le BTCS. L'adéquation de ces stabilisateurs pour

les sols à faible la teneur en argile et en limon (moins de 15%) reste un domaine de recherche (S.N.Malkanathi, N.Balthazaar, & A.A.D.A.J.Perera, 2020)

II.7.L'ajout de fibres

La ajout de fibres est couramment employée dans les techniques traditionnelles de construction en terre.

Elle consiste notamment à ajouter de la paille dans les terres qui sont travaillées par pétrissage puis appliquées sur des clayonnages en bois ou moulées sous forme de blocs de terre séchés au soleil, technique présente dans de nombreuses régions du monde depuis des millénaires. (Ghania, 2019)

II.7.1.L'ajout de fibres joue plusieurs rôles

Réduction, voire élimination de la fissuration de retrait ,Accélération du séchage par drainage de l'humidité vers l'extérieur du matériau ,Allègement du matériau ,Augmentation de la résistance à la traction, ce qui est sans doute le meilleur avantage.

La terre stabilisée avec des fibres présente donc une très bonne résistance à la fissuration ainsi qu'à la propagation des fissures car elles s'opposent au clivage lorsque la contrainte augmente.

Si l'on compare la résistance d'un matériau renforcé avec des fibres au matériau original sans fibre, on observe une résistance supérieure d'environ 15% pour le matériau contenant les fibres sauf dans le cas d'un matériau trop sableux où les fibres peuvent avoir un effet négatif.

Cela s'explique par le fait que les fibres modifient le comportement de la terre au-delà du point de rupture Il existe une quantité optimale de fibres à ajouter au-delà de laquelle on observe une perte de résistance. En effet, si l'on ajoute une quantité exagérée de fibres, la masse volumique sera trop diminuée et il y aura insuffisamment de points de contact entre les fibres et la terre. Ceci implique que les déformations ne seront plus transmises correctement, ce qui diminuera la résistance de la terre.

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

II.7.2.Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- ✓ Les fibres métalliques (acier, fonte)
- ✓ Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes)

- ✓ Les fibres minérales (amiante, verre, carbone)
- ✓ Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier)
- ✓ Les fibres animales (poil, laine, soie) (Ghania, 2019)

II.8. Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolanique, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H), qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique. (OURADA, 2016)

II.8.1. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des roches volcaniques (pyroclastites) possédant une texture scoriacée et alvéolaire de couleur rouge ou noire avec toutes les teintes intermédiaires.

Leur formation peut résulter de l'expansion rapide d'un magma en surface accompagnée d'un dégazage ou d'une interaction entre le magma et de l'eau. On les distingue des basaltes qui ont un aspect massif alors que les matériaux pouzzolaniques sont poreux, leur refroidissement rapide provoque la présence d'une structure amorphe vitreuse.

Le terme pouzzolane est étendu à tous les matériaux inorganiques, naturels ou artificiels qui ont des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire la capacité d'un matériau à faire prise en présence de chaux et de l'eau. La classification de ces matériaux est présentée dans la

(Figure 1.31) (OURADA, 2016)

II.8.1.1. Activité pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est définie comme la réaction entre les phases actives de la pouzzolane avec de la chaux. La quantité de matière amorphe détermine généralement la réactivité des pouzzolanes naturelles. La réaction pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux dans un mélange de chaux-pouzzolane ou la mesure de la silice et l'alumine soluble dans l'acide. Selon il y a plusieurs

paramètres influençant cette activité pouzzolanique, La nature des phases actives et leurs

proportions, la finesse des pouzzolanes, le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange, la durée et la température de cure (OURADA, 2016)

II.8.1.2.Utilisation

La pouzzolane est utilisée dans un grand nombre de domaines variés. Dans la stabilisation des sols pour les routes. En génie civil, les applications sont nombreuses. En plus d'être un composant normalisé des ciments et des bétons, elles présentent toutes les caractéristiques pour être utilisées en tant que granulats pour bétons légers.

En Algérie, il y a une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 Km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran. L'utilisation de la pouzzolane se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés. (OURADA, 2016)

II.8.2.Laitier de haut fourneau

II.8.2.1Généralités

Les laitiers de haut fourneau sont des sous produits de l'élaboration de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

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

L'origine des deux types de laitiers est la même, la différence entre ces deux matériaux réside

seulement dans leurs cristallographiques et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente. Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste (OURADA, 2016)

II.8.2.2.Activation du laitier

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfato-calcique (Ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de

dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant

réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate. La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux et les sulfates agissent comme des réactifs (OURADA, 2016)

II.8.2.3.Utilisation

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granulé peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable. (OURADA, 2016)

II.8.3.Poudre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de 1000°C pour la silice vitreuse, moins de 40°C pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux. (OURADA, 2016)

II.8.3.1.Utilisation

Le verre est utilisé dans le béton en fonction de sa taille : soit comme granulats, soit comme fines. Récemment, des études antérieures conduites à l'Université de Sherbrooke (Canada), portant sur la caractérisation de la poudre de verre et l'évaluation de ses performances dans les pâtes de ciment, les mortiers ou différents types de bétons (béton autoplaçant, béton haute performance) (OURADA, 2016)

II.9.Le compactage :

Le compactage est une opération qui s'accompagne d'une réduction du volume des vides dans un sol (figure II.5), donc une densité sèche plus importante. On constate, pour tous les matériaux, une relation très nette entre la densité sèche et la résistance mécanique. Celle-ci est d'autant plus élevée que le matériau est compact C'est ainsi que, pour une même composition et un même dosage, un béton est d'autant plus résistant qu'il est dense ; de même les pierres les plus denses ont les résistances mécaniques les plus élevées.

C'est également le cas pour les terres ; toutefois pour ces dernières, les densités que l'on peut obtenir demeurent relativement faibles. Un autre avantage de la densification est la diminution de la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau stabilisé et curé, ce qui influe favorablement sur la durabilité. Mais on doit veiller au cours du processus de compactage à ce qu'il reste assez d'eau pour que l'hydratation des minéraux du sol

et de la chaux ou de ciment (ajoutés comme stabilisants) se fasse dans des conditions normales . (Abdelohab & Ahmed, 2017)

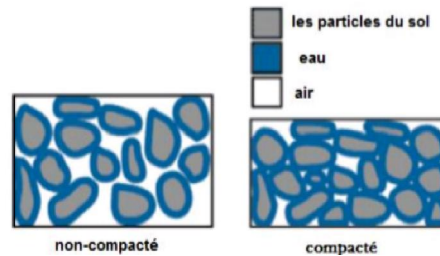


Figure II.5. : Effet du compactage sur les vides des sols

(Abdelohab & Ahmed, 2017)

II.9.1.Mode de compactage

Il existe quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre .Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de 50 % par rapport à la vibro-compression et de 20 % par rapport à la compression statique. (OURADA, 2016)

II.9.1.1.Le compactage dynamique

Est utilisé en géotechnique routière lors de la mise en œuvre du sol pour la construction des ouvrages :

- remblais routiers
- remblais de voies ferrées
- digues et barrages en terre
- plates-formes pour bâtiment
- etc.

Pour optimiser le compactage, il existe deux grands types d'essais correspondant à des modes opératoires de compactage sur chantier :

- essai Proctor normal
- essai Proctor modifié

Ces deux essais permettent d'étudier et/ou optimiser la mise en œuvre des matériaux, sans permettre d'étudier leur comportement en service. (Guyane, 2016)

II.9.1.2.Le compactage statique.

Il consiste à imprimer un effort croissant sur un matériau, de façon à le comprimer dans un moule. Dans « l'essai de compactage statique », le matériau est compacté de façon quasi-statique, et permet la fabrication d'éprouvettes homogènes qui serviront, d'une part pendant le compactage pour déterminer les paramètres de mise en œuvre, et d'autre part pour l'étude du comportement en service (R_c , R_t ...). (Guyane, 2016)

II.9.1.3.La vibro-compression

Ce mode de compactage associe la vibration du moule et l'application d'une charge de compression, en général assez faible. Il est utilisé pour la mise en œuvre des produits béton. (Guyane, 2016)

II.9.2.Influence de l'énergie de compactage

Quelle que soit le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale TEO et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la figure II.6. Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués. L'étude menée par Gooding, a montré que l'augmentation de la contrainte de compactage a un grand effet sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisée au ciment. Dans le même contexte, les résultats des travaux de Guettala et al, montrent que les résistances mécaniques augmentent avec l'augmentation de la contrainte de compactage jusqu'à un optimum de 17.5 MPa. Mais au-delà de cette valeur il y a une chute de la résistance de l'ordre de 7% pour une contrainte de compactage de 20 MPa. (Abdelohab & Ahmed, 2017)

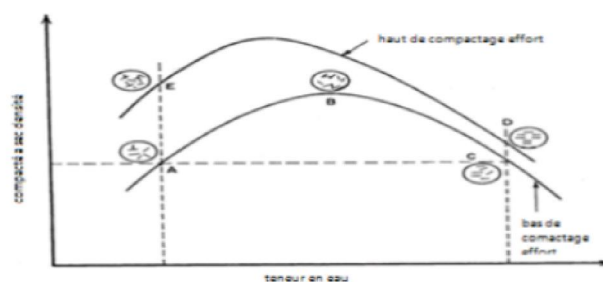


Figure.II .6 : Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol (Abdelohab & Ahmed, 2017)

II.10. Comment protéger une construction en terre contre les attaques chimiques ou climatiques ?

La principale faiblesse de la terre utilisée comme matériau de construction est sa sensibilité à l'eau. Pour protéger les constructions en terre, l'homme a développé une variété de stratégies: orientation du bâtiment et de ses murs en terre par rapport à la direction dominante de la pluie, toiture avancée, fondations imperméables ou, dans certains cas, enduit protecteur à la chaux.

Dans les cas extrêmes, pour lesquels il n'y a pas de conception appropriée de la terre des bâtiments leur permettant de résister aux dégâts des fortes pluies, la stabilisation par des liants inorganiques pourrait être une solution. Le produit chimique Stabilisation des matériaux terreux par des liants minéraux (parfois la chaux mais surtout le ciment) se généralise, ce qui pose la question de la pertinence de l'utilisation de la terre. Les raisons car cette stabilisation est multiple. Les principaux sont augmentés Résistance à l'eau et gains de performances mécaniques. Un autre raison est liée aux conditions de fabrication dans le cas de en pisé, l'utilisation de liants permet de réduire les temps de décollage et, dans le cas des briques en terre comprimée (CEB), il Facilite la manipulation des briques à court terme.

(Ouedraogo, Aubert, Tribout, & Escadeillas, 2019)

II.11. La relation entre le taux d'eau (teneur en eau) de la brique et durabilité :

Études précédentes ont rapporté l'effet de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques du BTC. Ils ont surtout observé une baisse résistance pour une teneur en eau plus élevée. Ceci est attribué à la diminution de l'aspiration lorsque la teneur en eau augmente. En réalité, lorsque la teneur en eau augmente, l'eau lubrifie les points de contact entre les grains et le frottement entre eux diminue. La courbe de rétention du sol permet d'estimer l'aspiration à l'intérieur du matériau connaissant sa teneur en eau. Une hystérésis généralisée existe, il est donc important de connaître le chemin hydrique suivi. La diminution de la force avec l'augmentation de la teneur en eau est très familière dans la littérature. Cette réduction peut provoquer, peu probable, des problèmes dans des conditions de fonctionnement normales. De plus, le module d'élasticité augmente lorsque la teneur en eau diminue. Ceci est dû au renforcement des liants argileux par l'évaporation des l'eau et le développement de la succion. C'est pourquoi, une bonne identification de l'effet de l'eau sur les propriétés mécaniques de BTC est nécessaire. (Serbah, Abou-bekr, Eid, & Taibi, 2018)

Dans la littérature, plusieurs études recommandaient certaines plages de la densité sèche et teneur en eau correspondante du BTC .le tableau 3 reprend les différentes gammes proposées dans la littérature. (Serbah, Abou-bekr, Eid, & Taibi, 2018)

Tableau II.2: Recommandation de gamme de compactage (Serbah, Abou-bekr, Eid, & Taibi, 2018)

Références	Technique	$\delta_{dmax}(KN/m^3)$	$W_i\%$
CRAterre 2012	BTC	16-22	5-15
Jiménez 2007	BTC	17.5-23	5-15
Morel 2003	BTC	18.6-18.7	/
Hakimi 1996	BTC	19.2-19.30	9.8-10.8
Olivier 1994	BTC	18.25-20.13	12-19
Ola 1987	BTC	16-19	/

II.12. Les essais expérimentaux pour évaluer la durabilité d'une brique de terre :

Les briques ont subi différents tests de laboratoire: résistance à la compression sur sec et humide états, absorption (capillaire et totale), mouillage séchage, congélation – décongélation et pulvérisation.....

II.12.1. Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance sèche des briques de terre comprimée destinés à la maçonnerie afin d'obtenir des résultats comparatifs indépendants du format de la brique. L'essai est réalisé selon la norme XP P 13-901. Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de ciment à une compression simple jusqu'à la rupture(figure) (OURADA, 2016)



Figure II.7.: cassure des blocs par l'essai de traction (a) , superposition de deux demi-blocs (interposition par un mortier de ciment)(b)essai d'écrasement de l'éprouvette La résistance (OURADA, 2016)

à la compression est donnée par la formule

$$R_c = 10 \times f / s$$

Où :

R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi-blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm²

II.12.2. Résistance à la compression humide

Les constructions sont souvent sujettes d'agressions de l'eau surtout par l'action de la capillarité et de l'aspersion ; par contre elles sont rarement immergées.

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté que l'échantillon soit humidifié par immersion complète durant deux heures. (OURADA, 2016)

II.12.3. Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (figure 2.25). Le coefficient d'absorption d'eau **C_b** correspond au taux d'absorption après un temps égal 10 min. Le coefficient C_b d'absorption d'eau est exprimé par la formule suivante:

$$C_b = 100 \times (M_h - M_d) / s \sqrt{t}$$

Avec :

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

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

t: est la durée d'immersion du bloc en minutes. (OURADA, 2016)

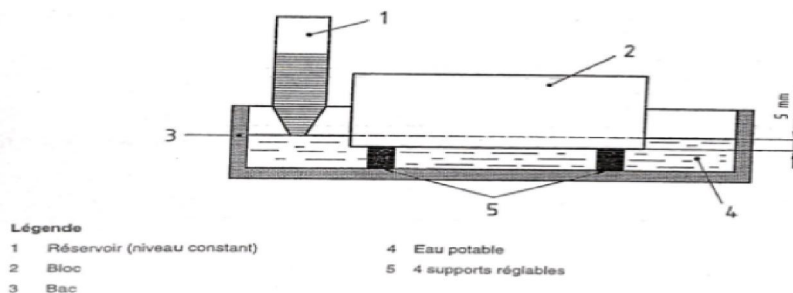


Figure. II.8: principe de l'essai d'absorption capillaire (OURADA, 2016)

II.12.4. Absorption totale

Diverses procédures peuvent être utilisées pour déterminer la capacité d'absorption totale de la brique (BS 3921: 1985) :

1. Immersion dans l'eau froide (24 à 48 heures) après séchage au four à masse constante.
2. Essai d'ébullition (5 heures).
3. Absorption sous test à vide.

Avec les méthodes ci-dessus, des résultats très différents peuvent encore être obtenus

Pour cette étude, nous avons utilisé l'essai par immersion dans l'eau froide et l'essai d'ébullition.

le premier essai consiste à immerger la brique dans un bac à eau pendant 24 h, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids de la brique à l'état sec P_s . L'absorption totale (TWA) est déterminée par la formule suivante :

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

En ce qui concerne l'essai d'ébullition, les briques sèches sont placées dans un bac d'eau à température ambiante. La température de l'eau est portée à ébullition pendant une période de 1 h, maintenues à 100°C pendant 5 h. Les briques laissées refroidir à la température ambiante entre 16 et 19 h. Les briques humides sont ensuite retirées et pesées.

L'absorption d'eau est évaluée comme indiquée dans l'équation. (OURADA, 2016)

II.12.5. Congélation et décongélation

En suivant la procédure décrite par ASTM D56, le test de congélation et décongélation consiste à placer un échantillon de sol sur un matériau absorbant saturé d'eau dans un réfrigérateur à une température de 23 C pendant une période un 24 h puis retiré.

L'échantillon est ensuite décongelé un environnement humide à une température de 21 ° C pendant une période de 23 h par jour, puis enlevé et brossé. Le test est répété pendant 12 cycles de congélation-décongélation, puis séché dans un four pour obtenir un poids constant. (A.Guettala, A.Abibsi, & H.Houari, 2006)

II.12.6. Test de pulvérisation

Doat et al a proposé un test par lequel une terre le bloc est placé sur une grille face à un jet de pulvérisation. La brique est vertical, à 17 cm d'un jet horizontal de pression de 1,6 kg / m², pendant deux heures. La résistance à l'érosion est évaluée en mesurant la profondeur des trous ou la perte de poids en briques. La plupart du temps, les résultats de ce test ne sont qu'indicatifs. Le taux maximum d'érosion (mm / h) est donnée simplement par la profondeur maximale de l'érosion.

Dans le cas où l'échantillon s'érode complètement en moins d'une heure, la profondeur est donnée par le rapport de la brique épaisseur au temps de pulvérisation. (A.Guettala, A.Abibsi, & H.Houari, 2006)

I.12.7. Essai de brosse métallique :

Dans ce test, la terre est compactée dans un moule de 100 mm de diamètre jusqu' à une épaisseur approximative de 125 mm. Après 7 jours de stockage, les éprouvettes sont séchées en étuve et pesées Elles sont ensuite placées dans l'eau pendant 5 heures, puis séchées et brossées par une brosse métallique ferme (avec une pression verticale constante) pour enlever tous les matériaux perdus pendant les cycles de séchage-humidification. Après

12 cycles de séchage et humidification, les éprouvettes sont séchées en étuve et leur masse finale est enregistrée. Le pourcentage des matières perdues en masse est calculé.

Plusieurs auteurs ont considéré ce teste comme typique pour tester la durabilité des BTC stabilisés au ciment. Fitzmaurice, dans son manuel, a proposé des valeurs limites des BTC en cas de bâtiments dans les zones urbaines, de 5% (de ciment) dans une région où la précipitation annuelle est supérieure à 500mm ; 10% (de ciment) dans une région où la précipitation annuelle est inférieure à 500mm. (Safia, 2014)

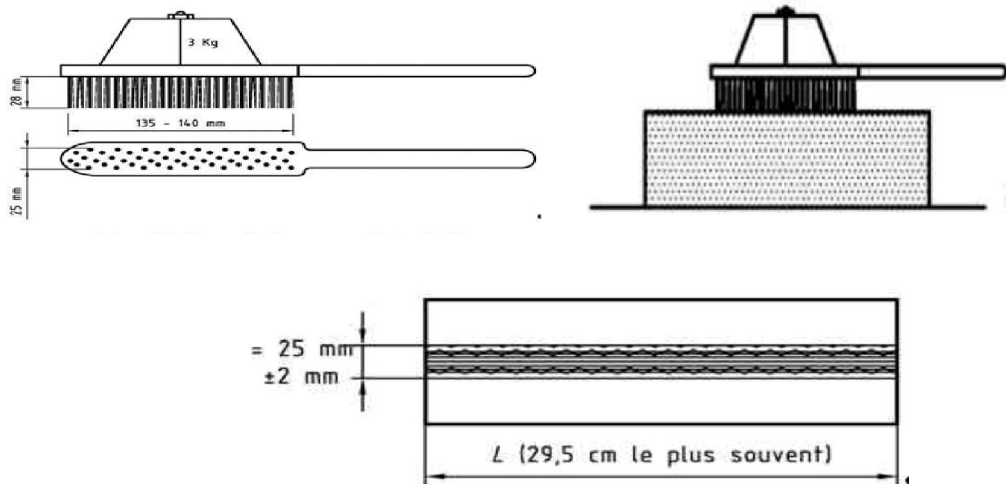


Figure II.9 : brosse d'acier pour essai d'abrasion ,calcul de surface de brosse Norme XP 13-901

II.12.8.Essai de goutte-à-goutte ("drip test")

La motivation de cet essai est de développer un test très simple pour que les maçons puissent déterminer eux-mêmes la pertinence de leur terre. Dans cet essai, une mèche en tissu mouillé passe dans 100 mm d'eau, les gouttes d'eau tombent de 400 mm de hauteur sur l'échantillon qui est incliné de 27° par rapport à l'horizontale .Cette action veut simuler des gouttes d'eau de pluie. Frenchamrelie la profondeur des piqûres après le test à un indice d'érodabilité. (Safia, 2014)

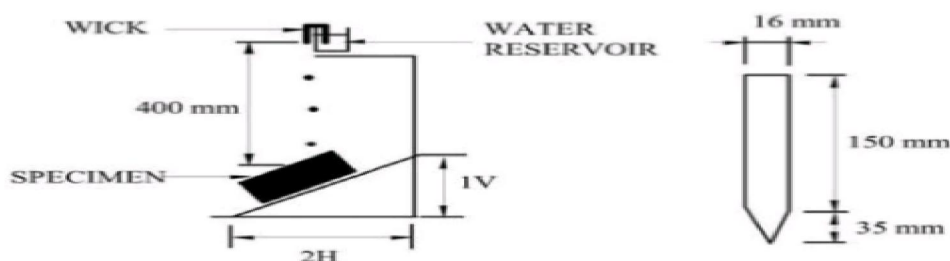


Figure II.10 : l'essai de goutte-à-goutte (drip test) (Safia, 2014)

II.12.9. Rapport de la résistance humide et à sec ("wet to dry strength ratio")

Ce type d'essai a été développé par CRATerre (Houben, H et al, 2006) sur des blocs de terre stabilisés. Les spécifications de cet essai sont : une résistance à la compression minimale à l'état "sec" de 2,4MPa ; une résistance à la compression minimale à l'état saturé de 1,2MPa; plus une exigence que le rapport de la résistance humide sur sec n'est pas inférieur à 0,5.

(Safia, 2014)

II.12.10. Exposition aux conditions climatiques

8 murs (15 cm d'épaisseur) ont été construits sur le toiture de l'Université de Biskra, disposés en rangée et suffisamment éloignés les uns des autres pour éviter la protection mutuelle. Ils étaient orientés Sud et Nord de sorte que l'une de leurs faces principales nord est exposée à les pluies dominantes. Les joints des murs étaient en ciment mortier. Habituellement, le dessus du mur d'essai est recouvert d'un chapeau comme ce serait en réalité. Cependant, ce n'est pas le cas dans le présent travail afin d'évaluer l'effet direct de les précipitations. Une vue générale des murs construits est donnée sur la Fig1.11.

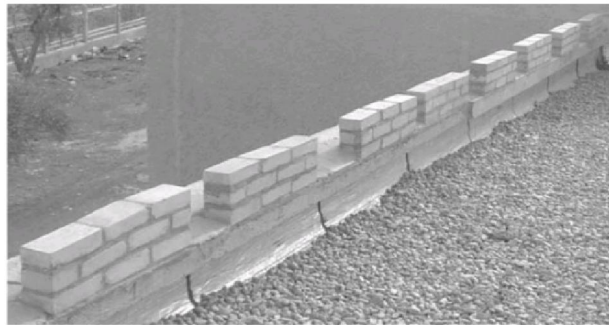


Figure II.11 : Vue générale des murs construits (A.Guettala, A.Abibsi, & H.Houari, 2006)

Un contrôle général a été effectué après la construction afin de détecter tout défaut ou dommage causé pendant la construction. Ensuite, périodique de deux mois des visites et inspections ont été programmées pour une période de 48 mois. (A.Guettala, A.Abibsi, & H.Houari, 2006)

II.12.11. Essai mouillage et de séchage

Pour déterminer la tenue et le comportement de brique de terre comprimée lorsqu'elle subit des alternances pluviométriques (saturation en hiver et séchage en été), un ensemble d'essais de mouillage /séchage a été effectué sur les différentes briques étudiées suivant la norme (ASTM D559-57 ,1977) dont le principe de l'essai est le suivant :

Dessécher les blocs jusqu'à masse constante à une température de 60-75°C.

Peser chaque bloc (masse sèche) et subir une série de 12 cycles comprenant :

05 heures d'immersion au bout desquelles le bloc est pesé (figure 1.12).

42 heures de séchage à l'étuve à une température de 75°C (figure 1.13).

Les briques sont brossées et pesées. Le cycle complet ne doit pas excéder 48 heures.

On recommence ce cycle douze (12) fois de suite puis les briques sont séchées à une température de 75°C jusqu'à masse constante. Les résultats de cet essai donnent la perte en masse maximum admise après 12 cycles de mouillage /séchage. Fitzmaurice (1958), a recommandé des limites sévères pour perte de poids selon la norme ASTM D559. La perte en masse admissible pour les constructions rurales est de

05% pour tout climat dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 500mm

10% pour les climats secs dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 500mm.

A noter que ces tests effectués au laboratoire sont généralement plus sévères qu'en réalité



Figure II .12.:Echantillon séché dans l'étuve (OURADA, 2016)



figure II.13:Echantillon émergé dans l'eau (OURADA, 2016)

Chaque essai est réalisé sur trois échantillons de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique (OURADA, 2016)

CHAPITRE III :

PROCEDURE EXPERIMENTALE

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les essais réalisées sur les briques de terre comprimées et stabilisées par ciment et chaux

III.2.Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans ce projet : 4type de terre, ciment , chaux ,eau

III.3.Origine de terre :

- ✓ Le sol utilisé provient de la région de M'sila (Algérie) il choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région :
- ✓ L'argile verte est extraite de la ville (Maadid).
- ✓ L'argile grise est extraite de la ville (Al-Rachana).
- ✓ L'argile rouge extraite à partir de (chaaba l'hamra).
- ✓ L'argile blanche extraite de la ville (Lkhmayis)



Fig III.1 :L'argile grise(Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III.2 :L'argile verte(Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III.3:L'argile rouge(Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III.4 :L'argile blanche(Laboratoire géo matériaux M'sila)

III.4.Essais d'identifications :

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des briques de terre exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques qui peuvent prédire la qualité des briques en fonction de leur utilisation:

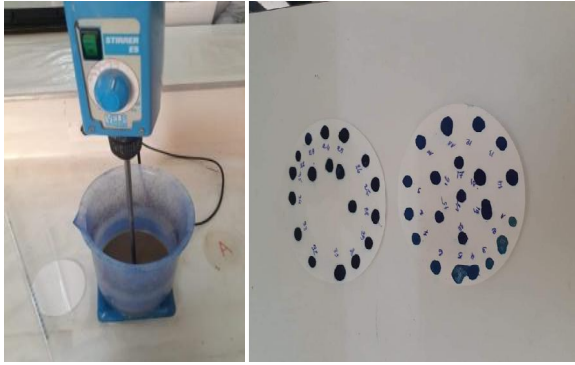


Fig III.5.Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)



Fig III .6 .Les limites d'Atterberg (NF P94-051)



Fig .III.7.Analyse granulométrique tamisage. (NF P 94-056)

III.5.Matériel spécifiques :

III.5.1.Moule utilisés :

un moule cylindrique a les dimensions suivantes :

- Hauteur de mole : 22 cm.
- Diamètre intérieur de moule : 7 cm.
- Diamètre extérieur de moule: 10 cm.
- Hauteur de piston : 8cm.
- Diamètre de piston : 7cm.

III.5.2.Presse manuelle :

- le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble – moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue.

III.6.Préparation de Mélange :

III.6.1.Etapes de préparation des mélanges :

- Sécher le sol à température 105
- Tamiser le sol dans un tamis de (5mm)
- On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : argile, ciment, chaux et eau.
- **Préparation des moules** : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les Moules sont prêts pour utilisation.
- **le malaxage** : L'opération est exécutée comme suit:
- On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment ou la chaux et on malaxe le mélange à sec durant 1 à 2 minutes
- **Le moulage des éprouvettes** : cette opération est exécutée à l'aide d'une presse manuelle du laboratoire de développement Géo matériaux d'université de M'sila
- **le démoulage des éprouvettes** : exécuté à l'aide d'un extracteur mécanique le poids du mélange humide pour chaque éprouvette est maintenu constant toutes les étapes à 700g, les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques .
- après le démoulage, les éprouvettes sont introduites dans une chambre de cure (température 50° C, Humidité ≤ 100 %) pendant 28 Jours



Fig.III.8 : moule utilisé(Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III .9: Des éprouvettes confectionnées(Laboratoire géo matériaux M'sila)



FigIII.10 : chambre de cure (Température ,Humidité) (Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III.11: presse manuelle(Laboratoire géo matériaux M'sila)



Fig III.12 : presse hydraulique(Laboratoire géo matériaux M'sila)

III.7.Préparation du mélange :

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

Tableau III.1 : élaboration des éprouvettes.

N° essai	Facteur1 NATUER DE TERRE	Facteur 2 TYPE DE STABILISATION(%)	Facteur 3 LA CURE	Facteur 4 (%) d'eau
1	T _r	CIMENT 6%	50-100	8%
2	T _r	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	10%
3	T _r	CIMENT 6%	50-100	13%
4	T _r	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	8%
5	T _r	CIMENT 6%	50-100	10%
6	T _r	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	13%
7	T _v	CHAUX 12%	50-100	8%
8	T _v	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	10%
9	T _v	CHAUX 12%	50-100	13%
10	T _v	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	8%
11	T _v	CHAUX 12%	50-100	10
12	T _v	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	13
13	T _B	CIMENT 6%	50-100	8%
14	T _B	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	10
15	T _B	CIMENT 6%	50-100	13
16	T _B	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	8%
17	T _B	CIMENT 6%	50-100	10
18	T _B	CIMENT 6%	50-100(dans l'eau)	13%
19	T _G	CHAUX 12%	50-100	8%
20	T _G	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	10
21	T _G	CHAUX 12%	50-100	13%
22	T _G	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	8%
23	T _G	CHAUX 12%	50-100	10%
24	T _G	CHAUX 12%	50-100(dans l'eau)	13%

III.10.Conclusion :

Ce chapitre nous montre comment sont fabriquées les éprouvettes et les équipements de fabrication utilisés et nous a permis de mieux analyser les résultats et de mieux comprendre l'influence des différents facteurs qui ont été étudiés

CHAPITRE IV :
METHODE DES PLANS
D'EXPERIENCE

IV.1.INTRODUCTION :

il est souvent nécessaire de réaliser des expériences afin de modéliser le comportement d'un phénomène complexe (construction) .la méthode de plans d'expérience a pour objectif d'obtenir un maximum d'information sur le phénomène étudiée un minimum d'expérience .

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

IV.2 .Qu'est ce que un plan d'expérience :

Les plans d'expériences constituent essentiellement un stratégie de planification d'expérience afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statique relativement simple des résultats (karam, 2004)

IV .3.Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation du résultat. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois s'sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expérience assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum. (Jacques Goupy, 2005).

IV.4 .Le plan factoriel complet et le plan factoriel fractionnel

IV.4.1 .Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continus et pour les variables discrètes, (Jacques GOUPY, 2006).

IV.4.2Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux 2k-q

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou 2q fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant , (Jacques GOUPY, 2006).

IV.5 .L a réponses :

une réponse doit être représentative, quantifiable et le moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes .pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative.

Réponse de cette étude est Fabrication des briques de terre durable .

IV .6 .Facteurs :

Facteur 1 : les stabilisant (ciment/ chaux)

Facteur 2 : la cure

Facteur 3 : type de terre

Facteur 4 : quantité d'eau

IV.7. Les niveaux des facteur :

Type de terre	Terre vert	Terre rouge	Terre blanche	Terre gris
Stabilisant	Chaux 12%	ciment 6%		
La cure	50-100	50-100 dans (eau)		
Quantité d'eau	8 %	10%	13%	

IV.8.Logiciels utilisés :

IV.8.1.Présentation de logiciel « Mini tab » :

Mini tab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par Mini tab, Inc. pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ».Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues. (Tahm & Aahmed, 2019)

IV.8.2.Diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance de différentes causes d'un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation. (Tahm & Aahmed, 2019)

IV.8.3.Diagramme des effets principaux :

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

Lorsque vous sélectionnez Stat > ANOVA > Graphique des effets principaux, Minitab crée un graphique qui utilise les moyennes des données. Après avoir ajusté et stocké un modèle, vous pouvez l'utiliser pour générer des graphiques utilisant des moyennes ajustées. (Tahm & Aahmed, 2019)

IV.8.4.Diagramme des interactions :

La fonction Diagramme des interactions permet de déterminer l'influence d'un facteur de catégorie sur la relation entre un second facteur de catégorie et une réponse continue. Ce diagramme affiche les moyennes correspondant aux niveaux d'un facteur sur l'axe des X, ainsi qu'une courbe distincte pour chaque niveau d'un autre facteur. (Tahm & Aahmed, 2019)

IV.8.5.Equation de régression :

Une équation de régression permet de décrire la relation entre la réponse et les termes du modèle. L'équation de régression est une représentation algébrique de la droite de régression. L'équation de régression pour le modèle linéaire prend la forme suivante :

$$Y = b_0 + b_1x_1.$$

Dans l'équation de régression, Y représente la variable de réponse, b_0 est la constante ou l'ordonnée à l'origine, b_1 est le coefficient estimé du terme linéaire (également appelé pente de la droite) et x_1 est la valeur du terme.

L'équation de régression avec plusieurs termes prend la forme suivante :

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k$$

Dans l'équation de régression, les lettres représentent les éléments suivants :

y est la variable de réponse

b₀ est la constante

b₁, b₂, ..., b_k sont les coefficients

X₁, X₂, ..., X_k sont les valeurs du terme

Si le modèle contient à la fois des variables continues et des variables de catégories, le tableau de l'équation de régression peut afficher une équation pour chaque combinaison de niveaux des variables de catégorie. Pour utiliser ces équations afin d'effectuer des prévisions, vous devez choisir celle qui est la mieux adaptée, en vous fondant sur les valeurs des variables de catégorie, puis entrer les valeurs des variables continues. (Tahm & Aahmed, 2019)

IV.9.Conclusion :

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

Et peut aider à la conception et à l'industrialisation du produit, ainsi qu'à la résolution de problèmes complexes.

Les résultats que vous attendez de ces étapes seront obtenus avec un maximum de rigueur et beaucoup plus rapidement qu'avec les méthodes traditionnelles, donc avec une efficacité économique certaine.

CHAPITRE V :
ANALYSES DE RESULTATS

V-1 Analyses de résultats:

L'analyse des résultats a été effectuée par le logiciel Minitab qui représente une application de la méthodologie des plan d'expérience :

1. Tout d'abord la présentation des données a été faite selon la matrice sous forme d'un tableau de combinaisons des différents variables (les facteurs) et les valeurs des résultats obtenus
2. Ce logiciel permet la représentation des résultats sous forme:
 - Diagramme de Pareto des effets pour la perte de masse et la résistance
 - L'effet de chaque facteur pris individuellement sur la réponse
 - Ensuite l'interaction des facteurs prise deux à deux sur la réponse
 - La modélisation par une équation mathématique de l'ensemble des expériences effectués par une fonction qui lie la répons avec les différents facteurs et leurs interaction
 - Cette modélisation permet de prédire la répons pour n'importe quelle valeurs de facteurs choisies
 - Ce logiciel permet aussi de tracer les diagrammes de surface entres les facteurs et la réponse

Tableau V.1 : Les données et résultats pour Les pertes des masses et les résistances obtenus des BTC

Nature de Terre	Type de stabilisation	Cure	Eau(%)	Perte de masse	Résistance
Facteur 01	Facteur 02	Facteur 03	Facteur 04	Réponse 1	Réponse 2
T-Blanche	Ciment(6%)	Eau	10	4	12
T-Verte	Chaux(12%)	Eau	13	39	1
T-Verte	Chaux(12%)	Eau	8	24	5
T-Blanche	Ciment(6%)	Eau	13	24	5
T-Verte	Chaux(12%)	Air	8	34	2
T-Rouge	Ciment(6%)	Eau	8	14	8
T-Blanche	Ciment(6%)	Eau	8	16	7
T-Rouge	Ciment(6%)	Eau	10	6	10

T-Verte	Chaux(12%)	Air	10	24	5
T-Grise	Chaux(12%)	Eau	13	17	6
T-Grise	Chaux(12%)	Eau	10	32	0
T-Grise	Chaux(12%)	Air	10	42	0
T-Blanche	Ciment(6%)	Air	13	34	2
T-Blanche	Ciment(6%)	Air	10	14	9
T-Grise	Chaux(12%)	Eau	8	42	0
T-Grise	Chaux(12%)	Air	8	52	0
T-Rouge	Ciment(6%)	Air	8	24	5
T-Rouge	Ciment(6%)	Air	13	28	3
T-Grise	Chaux(12%)	Air	13	27	4
T-Rouge	Ciment(6%)	Air	10	16	7
T-Blanche	Ciment(6%)	Air	8	26	5
T-Rouge	Ciment(6%)	Eau	13	28	3
T-Verte	Chaux(12%)	Eau	10	14	9
T-Verte	Chaux(12%)	Air	13	39	1

V-2 .interprétation des résultats des diagrammes :

V.2.1.diagramme de Pareto des effets pour la perte de masse

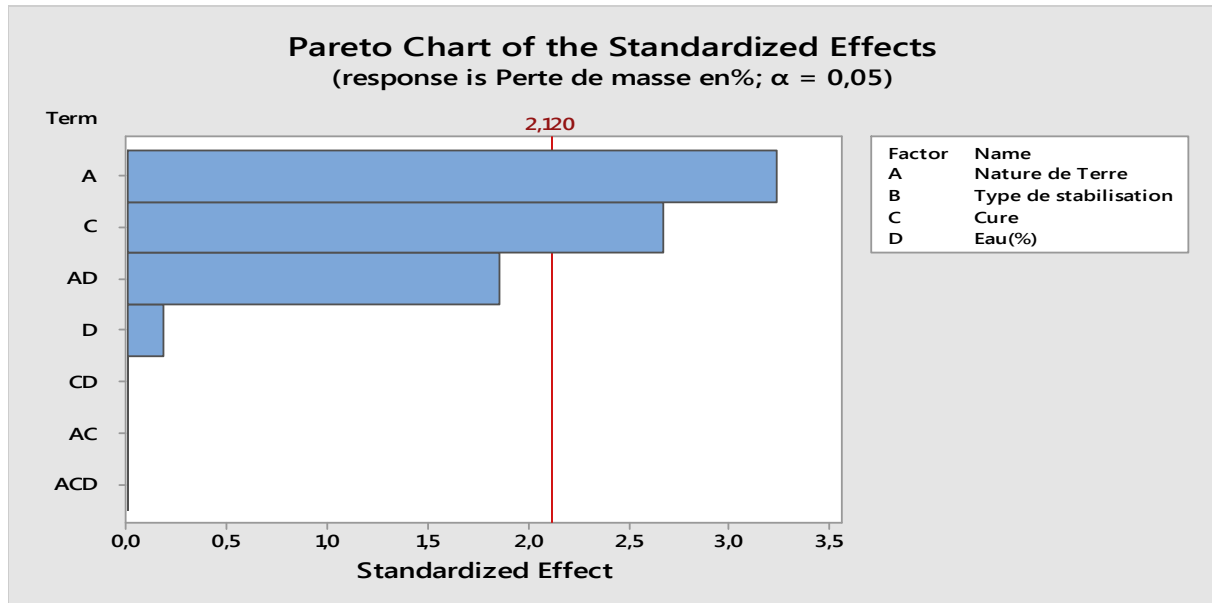


Fig V.1.Diagramme des effets pour la perte de masse

Ce graphe montre que Les facteurs qui influents sur la perte de masse sont classés par ordre :

- La nature de terre. (A)
- La cure.(c)
- L'interaction de la nature de terre et la quantité d'eau(%). (AD)
- La quantité d'eau a une effet très fiable (D)

V.2.2. diagramme de Pareto des effets pour la résistance

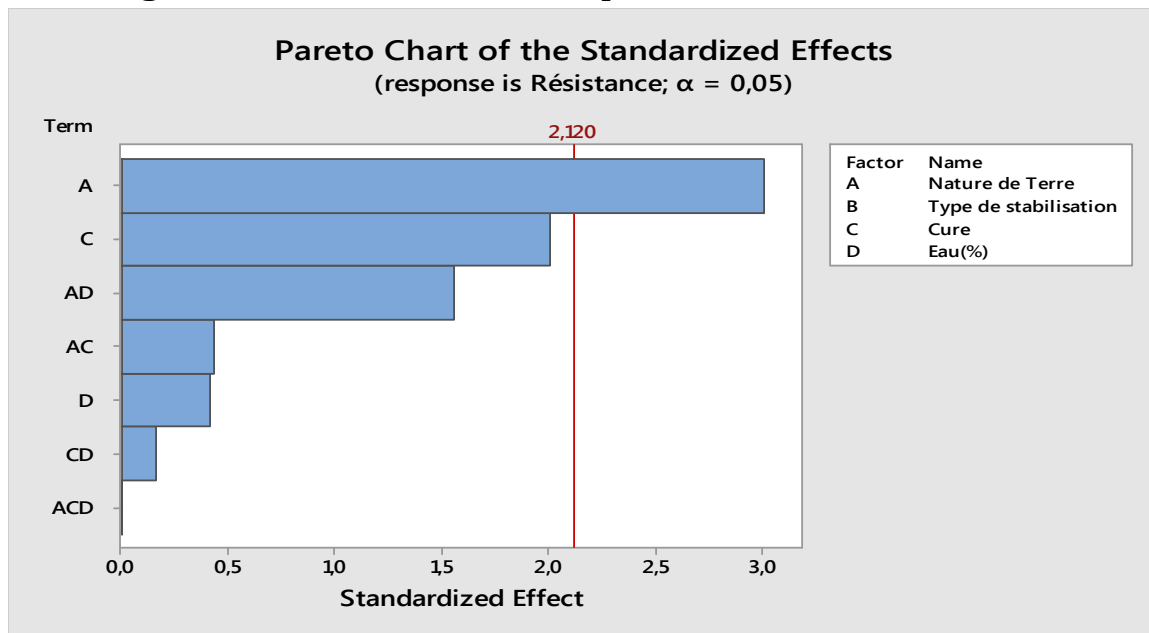


Fig.V.2. Diagramme des effets pour la résistance

-Ce graphe montre que Les facteurs qui influents sur la résistance sont classés par ordre :

- Nature de terre. (A)
- La cure.(C)
- L'interaction de la nature de terre et la quantité d'eau (%).(AD)
- L'interaction de la nature de terre et la cure a un effet très faible (AC)
- La quantité d'eau a un effet très faible (D)
- L'interaction de la cure et la quantité d'eau a un effet très faible (CD)

V.2.3.L'effet de chaque facteur pris individuellement sur la perte de masse

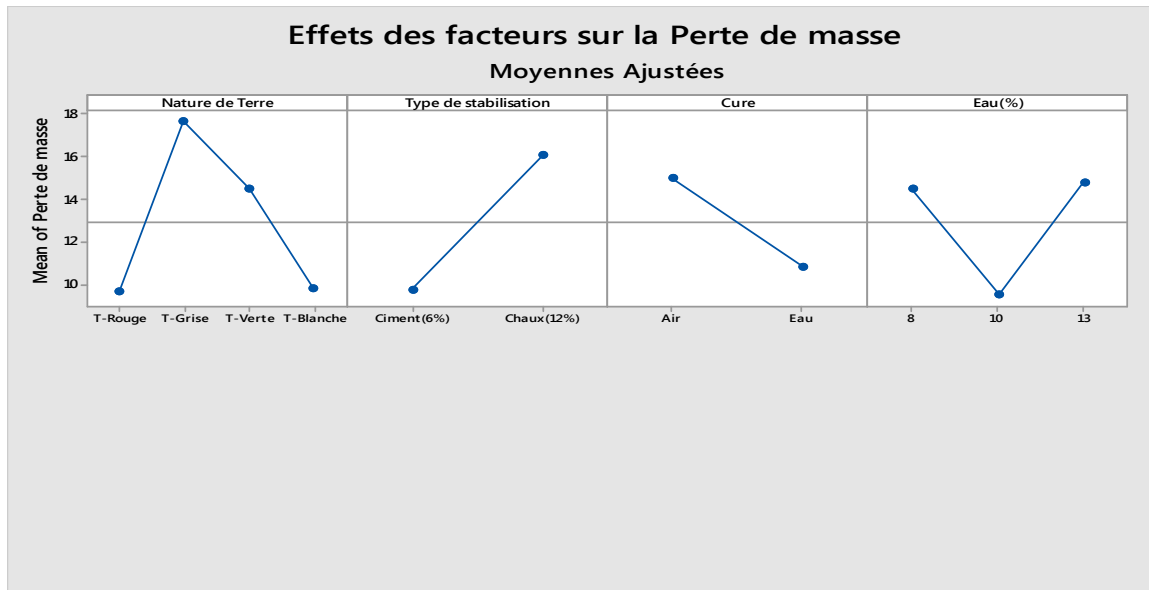


Fig V.3.Graphique des effets des facteurs sur la perte de masse.

Ce graphe indique l'effet de chaque facteur pris individuellement sur la perte de masse :

1. les terre (rouge, blanche) ont les moindres pertes de masse alors que la terre grise et verte ont une forte perte de masse.
2. la perte de masse diminue lorsque on utilise la stabilisation ciment au lieu de la chaux
3. La perte de masse diminue lorsqu'on utilise la cure d'eau au lieu de la cure d'air.
4. La perte de masse diminue lorsqu'on utilise 10% d'eau au lieu de 8% et 13%

V.2.4.l'interaction des facteurs prise deux à deux sur la perte de masse

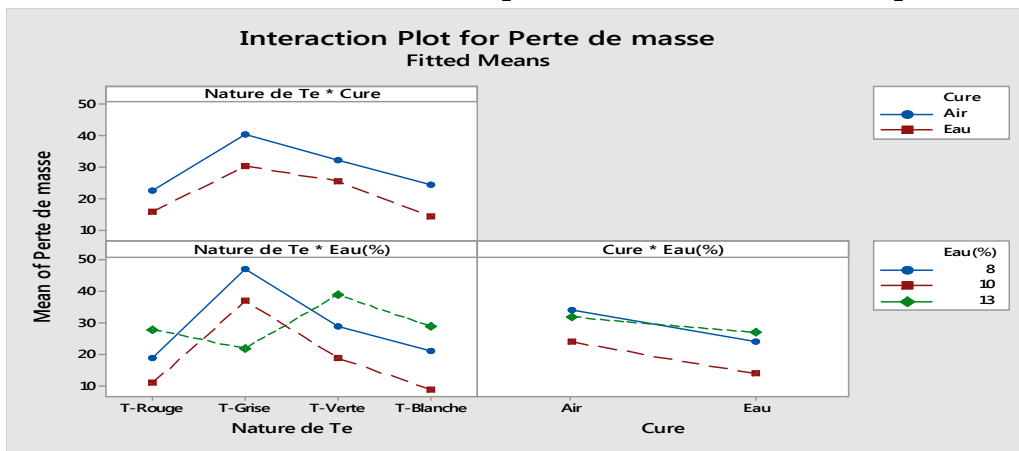


Fig V.4.Diagramme des interactions pour la perte de masse.

Par l'interaction de :

1. Nature de terre avec la cure : La minimum de perte de masse est obtenu pour les terre rouge et blanche à condition que la cure (eau) .

La maximum de perte de masse est obtenue pour les terre grise et verte à condition que la cure (Air)

2. Nature de terre avec la quantité d'eau (%) : La minimum de perte de masse est obtenu pour la terre rouge et blanche à condition que la quantité d'eau de gâchage (10%).

La maximum de perte de masse est obtenue pour les terre grise et verte à condition que la quantité d'eau de gâchage (8%,13%)

3. La cure avec la quantité d'eau (%) : La minimum de perte de masse est obtenu pour la cure eau à condition que la quantité d'eau de gâchage (10%).

La maximum de perte de masse est obtenue pour la cure air à condition que la quantité d'eau de gâchage (8%,13%)

V. 2.5. l'interaction des facteurs prise deux à deux sur la résistance

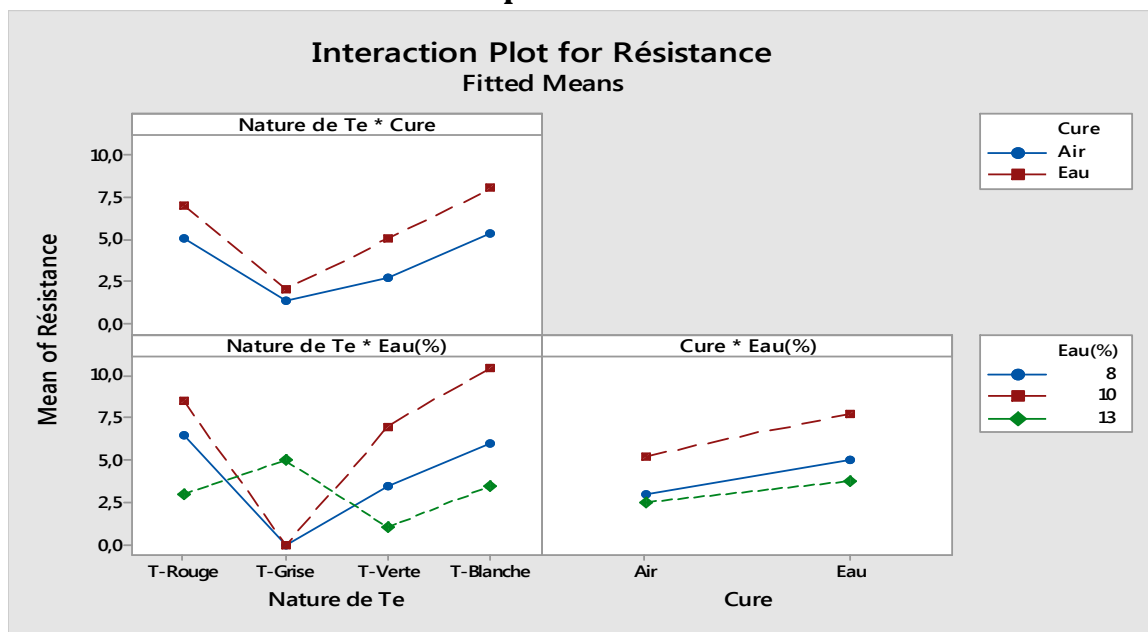


Fig .V.5. Diagramme des interactions pour la résistance.

Par l'interaction de :

1. Nature de terre avec la cure : les meilleures résistances obtenues pour les terre (rouge, blanche) à condition la cure (eau)

La mauvaise résistance obtenue pour les terres grise et verte à condition la cure air

2. Nature de terre avec quantité d'eau (%) : Les meilleures résistances obtenues pour les terre (rouge et blanche) à condition la quantité d'eau de gâchage 10%

La mauvais résistances obtenues pour les terre grise et verte à condition la quantité d'eau de gâchage par terre grise (8%,10%) et la terre verte (13%)

3. La cure avec la quantité d'eau (%) : les meilleures résistances obtenues pour la cure dans eau à condition la quantité d'eau (10%)

La mauvaise résistance obtenues pour la cure dans air à condition la quantité d'eau (8%,13%)

V.2.6. La modélisation par une équation mathématique

V.2.6.1. Equation de régression en unité codé

Equation de la résistance après simplification

Résistance = 4,542 + 1,458 Nature de Terre_T-Rouge - 2,875 Nature de Terre_T-Grise- 0,7083 Nature de Terre_T-Verte + 2,125 Nature de Terre_T-Blanche- 0,9583 Cure_Air + 0,9583 Cure_Eau - 0,5417 Eau(%)_8 + 1,958 Eau(%)_10- 1,417 Eau(%)_13

Exemple(1) :

Terre rouge, La cure (eau), quantité d'eau 10%

Résistance = 4,542 + 1,458 Nature de Terre_T-Rouge(1)- 2,875 Nature de Terre_T-Grise(0) - 0,7083 Nature de Terre_T-Verte(0) + 2,125 Nature de Terre_T-Blanche(0) - 0,9583 Cure_Air(0) + 0,9583 Cure_Eau(1) - 0,5417 Eau(%)_8(0) + 1,958 Eau(%)_10(1)- 1,417 Eau(%)_13(0)

Résistance =4,542+1,458+0,9583+1,958=8,9163

La meilleure **résistance**

Exemple (2) :

terre grise, la cure (eau), quantité d'eau (13%)

Résistance =4,542 + 1,458 Nature de Terre_T-Rouge(0) - 2,875 Nature de Terre_T-Grise(1)- 0,7083 Nature de Terre_T-Verte(0) + 2,125 Nature de Terre_T-Blanche(0)- 0,9583 Cure_Air(0) + 0,9583 Cure_Eau(1) - 0,5417 Eau(%)_8(0)+ 1,958 Eau(%)_10(0)- 1,417 Eau(%)_13(1)

Résistance =4,542-2,875+0,9583-1,417=1,2083 faible résistance

Exemple(3):

terre verte, la cure (air), quantité d'eau (13%)

Résistance = $4,542 + 1,458 \text{ Nature de Terre_T-Rouge}(0) - 2,875 \text{ Nature de Terre_T-Grise}(0) - 0,7083 \text{ Nature de Terre_T-Verte}(1) + 2,125 \text{ Nature de Terre_T-Blanche}(0)$

$- 0,9583 \text{ Cure_Air}(-1) + 0,9583 \text{ Cure_Eau}(0) - 0,5417 \text{ Eau}(\%)_8(0) + 1,958 \text{ Eau}(\%)_10(0) - 1,417 \text{ Eau}(\%)_13(1)$

Résistance = $4,542 - 0,7083 - 1,417 + 0,9583 = 3,375$ faible résistance

Exemple(4):

terre blanche, la cure (eau), quantité d'eau (10)

Résistance = $4,542 + 1,458 \text{ Nature de Terre_T-Rouge}(0) - 2,875 \text{ Nature de Terre_T-Grise}(0) - 0,7083 \text{ Nature de Terre_T-Verte}(0) + 2,125 \text{ Nature de Terre_T-Blanche}(1)$

$- 0,9583 \text{ Cure_Air}(0) + 0,9583 \text{ Cure_Eau}(1) - 0,5417 \text{ Eau}(\%)_8(0) + 1,958 \text{ Eau}(\%)_10(1) - 1,417 \text{ Eau}(\%)_13(0)$

Résistance = $4,542 + 2,125 + 0,9583 + 1,958 = 9,5833$ La meilleure résistance

Equation de la Perte de masse après simplification

Perte de masse = $25,83 - 6,500 \text{ Nature de Terre_T-Rouge} + 9,500 \text{ Nature de Terre_T-Grise} + 3,167 \text{ Nature de Terre_T-Verte} - 6,167 \text{ Nature de Terre_T-Blanche} + 4,167 \text{ Cure_Air} - 4,167 \text{ Cure_Eau} + 3,167 \text{ Eau}(\%)_8 - 6,833 \text{ Eau}(\%)_10 + 3,667 \text{ Eau}(\%)_13$

Exemple(1) :

terre rouge, la cure eau, la quantité d'eau (10%)

Perte de masse = $25,83 - 6,500 \text{ Nature de Terre_T-Rouge}(1) + 9,500 \text{ Nature de Terre_T-Grise}(0) + 3,167 \text{ Nature de Terre_T-Verte}(0) - 6,167 \text{ Nature de Terre_T-Blanche}(0) + 4,167 \text{ Cure_Air}(0) - 4,167 \text{ Cure_Eau}(1) + 3,167 \text{ Eau}(\%)_8(0) - 6,833 \text{ Eau}(\%)_10(1) + 3,667 \text{ Eau}(\%)_13(0)$

Perte de masse = $25,83 - 6,5 - 4,167 - 6,833 = 8,833$ La minimum de perte de masse

Exemple(2) :

terre grise, la cure (eau), la quantité d'eau (13%)

Perte de masse = 25,83 - 6,500 Nature de Terre_T-Rouge(0) + 9,500 Nature de Terre_T-Grise(1)+ 3,167 Nature de Terre_T-Verte(0) - 6,167 Nature de Terre_T-Blanche(0)+ 4,167 Cure_Air(0) - 4,167 Cure_Eau(1) + 3,167 Eau(%)_8(0) - 6,833 Eau(%)_10(0) + 3,667 Eau(%)_13(1)

Perte de masse = 25,83+9,5-4,167+3,667=34,83 **La maximum de perte de masse**

Exemple(3) :

terre verte, la cure (eau), la quantité d'eau (10%)

Perte de masse = 25,83 - 6,500 Nature de Terre_T-Rouge(0) + 9,500 Nature de Terre_T-Grise(0)+ 3,167 Nature de Terre_T-Verte(1) - 6,167 Nature de Terre_T-Blanche(0)+ 4,167 Cure_Air(1) - 4,167 Cure_Eau(0) + 3,167 Eau(%)_8(0) - 6,833 Eau(%)_10(1) + 3,667 Eau(%)_13(0)

Perte de masse = 25,83+3,167+4,167-6,833=26,781 **La maximum de perte de masse**

Exemple(4) :

terre blanche, la cure (eau), la quantité d'eau (10)

Perte de masse = 25,83 - 6,500 Nature de Terre_T-Rouge(0) + 9,500 Nature de Terre_T-Grise(0)+ 3,167 Nature de Terre_T-Verte (0)- 6,167 Nature de Terre_T-Blanche(1)
+ 4,167 Cure_Air(0) - 4,167 Cure_Eau(1) + 3,167 Eau(%)_8(0) - 6,833 Eau(%)_10(1)
+ 3,667 Eau(%)_13(0)

Perte de masse = 25,83-6,167-4,167-6,833=8,663 La minimum de perte de masse

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le brique de Terre Compressé et Stabilisé est un produit répondant parfaitement aux enjeux et contraintes actuels connus dans le monde du bâtiment. Par sa simplicité de mise en œuvre (maçonnerie classique), les BTS peuvent constituer une solution alternative aux habituels blocs de ciment creux et permettre ainsi de renforcer l'aspect environnemental de l'opération en utilisant un matériau peu cher, résistant aux contraintes de la majorité des projets, naturel en apportant des solutions sur le plan de la gestion de l'humidité et de la qualité de l'air intérieur et surtout durable puisque ne nécessitant que peu d'émissions de CO2 lors de sa fabrication et pouvant être produit partout .

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

Le but de notre étude est d'obtenir un BTCS durable bonne résistance mécanique et forterésistance a l'eau

Dons notre étude ,nous avons utilisé la méthode de conception expérimentale parce que la conception des expériences est essentiellement une stratégie de planification de l'expérience afin d'obtenir des conclusions solides et suffisantes d'une manière efficace et économique .les résultats ont été lus à travers le logiciel « Minitab » ;ils seront donnés sous formes des graphes et des figures bien explicites .

Les résultats obtenues on montrée que :

- choix de type d'argile et un paramètre important sur la compacité et la résistance de la brique.
Dans notre étude, nous avons constaté que la terre rouge et la terre blanche avaient la meilleure résistance à la fabrication de BTC.
- Le traitement dans l'eau donne un meilleur résultat que le traitement dans l'air
- La chaux est incompatible avec la fabrication Btc par rapport au ciment
- L'augmentation ou la diminution du pourcentage d'eau réduit la résistance des briques de terre Le meilleur pourcentage d'eau est de 10%.

Les connaissances que nous avons acquises par cette étude

- A partir de la bibliographie, l'architecture en terre n'est pas une structure pauvre et que les habitats en terre apportent du confort
- le choix du type de sol argileux est important pour la consistance et la résistance des briques
- Savoir formuler et fabriquer une brique de terre résistante à diverse condition environnementale.

Conclusion générale

- Savoir identifier les facteurs influents sur la résistance et la durabilité de la brique de terre
- savoir analyser et résumer et modéliser les résultats par méthodologie des plans d'expériences
- Savoir à utiliser les machines et équipements de laboratoire.
- Ce travail expérimental de mémoire de fin d'étude nous qualifie pour le travail sur le terrain et pour la vie professionnelle dans le domaine des contrôles des matériaux de génie civil

Liste des références

A.Guettala, A.Abibsi, & H.Houari. (2006). durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure .

Abdelohab, L., & Ahmed, H. (2017). caractérisation physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de peneu usés-verre).

Amaziam, L. (2018). unfired clay bricks with enhanced properties project report. *thèse* .

Bachire, T. (2014). ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES .

BERRAHAIL, T. (2009). la terre un matériau de construction une alternative pour une solution durable.

D.Miracourt. (2017). stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au burkina faso.

D.Sitton, J., Zeinali, Y., H.Heidarian, W., & A.STORY, B. (2018). effect of mix design on compressed earth block strength.

Ep, A. A., & SALIMA, A. K. (2012). performance thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides:cas de timimone .

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

Guyane, D. (2016). construire en terre crue de guyane.

H.B.Nagaraj, M.V.Sravan, T.G.Arun, & k.S.Jagadish. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of compressed stabilized earth blocks .

HACHEM, C. (2017). Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des briques en terre confectionnée par des fibre végétal locale .(cas de ville de ouargla).

HAMZA, A. Z. (2017). Enjeux de la valorisation et de la diversification des matériaux locaux de construction dans les perspectives d'un développement durable de la région de (HODNA).

IZEMMOUREN, O. (2016). effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre crue.

J.AUBERT, A.Marcom, P.Oliva, & P.Segui. (2014). chequered earth construction in southwestern france .

J.PAULUS. (2015). CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: dispositions qualitatives,constructives et architecturales- application à un cas pratique ,ouagadougou.

Jacques GOUPY. (2006). *LES PLANS D'EXPERIENCES*. MODULAD, .

lamouri-Hannani, H. (2014). Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre ancienne et contemporaines à timimoun.

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

Meukam, P. (2004). VALORISATION DZS BRIQUE DE TERRE STABILISEES EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS .

Ouedraogo, K. A., Aubert, J.-E., Tribout, C., & Escadeillas, g. (2019). Is stabilization of earth briks using low cement or lime contentes relevant ?

OURADA, I. (2016). effet des ajouts minéraux sur la durabilité des brique de terre comprimée .

OUSSAMA, D. (2018). Valorisation de brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et de l'chaux.

phung, T. A. (2018). formulation et caractérisation d'un composite terre végétales;la Bauge.

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

S.N.Malkanathi, N.Balthazaar, & A.A.D.A.J.Perera. (2020). lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt .

SAFIA, S. (2014). La construction en pise entre performance énergétique et perception des usagers cas d'un village kabyle ait itchir.

Serbah, B., Abou-bekr, N., Eid, S. b., & Taibi, S. (2018). dredged sediments valorisation in compressed earth blocks:suction and water content effect on their mechanical properties.

Soumaia, H. (2015). etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de ouargla .

Stagiaire, L. (2011). bâtir un mur en brique de terre comprimée .

Taallah, B., & Guttala, A. (2016). the machanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibres .

Tahar, B. (2009). la terre un matériau de construction unbe alternative pour une solition durable .

Tahm, L., & Aahmed, A. (2019). caractérisation de durabilité de brique de terre comprimée et stabilisée(BTC) sous l'effet des actions cyclique de mouillage-séchage.

Villamizar, M. C., Araque, V. S., & Reyes, C. A. (2012). Effectof the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks.

ANNEXES

L'état actuel le travail de recherche sur la durabilité de brique de terre crus :

En Sri Lanka : d'après un article de (S.N.Malkanathi, N.B.alhazaar, & A.A.D.A.J.Perera, 2020) réalisation de cette étude dans le but de déterminer l'adéquation des combinaisons de chaux avec du ciment à la chaux comme stabilisation pour la production de BTCS à faible teneur en argile et en limon.

Utilisation du sable de rivière pour ajouter la teneur du sable en argile et en limon, Des

Comparaison.

Le sol choisi pour cette étude était modifié pour obtenir des teneurs en argile et en limon de 5%, 10% et 15%.

Pourcentages de chaux de 5%, 10% et 15% en poids comme stabilisant ont été sélectionnés.

Des blocs stabilisés au ciment avec 10% et 8% de ciment en poids ont été préparés à des fins de comparaison

Les blocs stabilisés ont été testés pour la densité sèche, l'absorption d'eau et les résistances à la compression humide et sèche sur 28 jours et ont été comparés aux normes SLS 1382.



Fig : mélange de sol et blocs coulés

En Algérie : d'après un article de (S , Chaibeddra ,F . Kharchihg, 2019 (ce travail examine l'effet des sulfates sur le comportement se (BTCS) produits à partir de deux terre différents de distribution granulométrique et stabilise avec différents liants dont le ciment CEM I et CEM II résistant aux sulfates et à la chaux.

Utilisation de différentes presses pour fabriquer les blocs

Contrôle des performances du matériau basé sur le développement de la résistance à la compression et du poids des blocs après traitement chimique contenant du sulfate



En Nigeria : d'après un article de (Banjo A. Akinyemi ,2020) il étudie le potentiel d'utilisation de la terre rouge ,de la poussière de carrière et de matériaux alternatifs pour le sable de rivière dans la production de blocs de sable.

Utilisez des moles de 225*225*450 mm à 40% de vide pour produire des échantillons de test compression

On mettra l'échantillon dans traitement naturelle dans laboratoire à 24 c pendant 7,14,21 et 28j avant le test

Tester chaque bloc a une vitesse de chargement de 15mm/ min avec une machine d'essai de pression 2000 KN



Poussière de carrière



Terre rouge

	PAYS	SUJET	APPREIL	NOUVEAUTE	RESULTAT
(RUIZ, Zhang, Edris, Canas, & Garijo, 2018)	Madrid ,spain	Une étude approfondie des propriétés mécaniques des blocs de terre comprimée	Compression Flexion traction	étudier les propriétés mécaniques d'une type BTCS (résistance à la compression)	La compressibilité des échantillons recouverts de caoutchouc, c'est environ 60%de mois que cela couvert de contreplaqué ou sans couvercle
(J.C.MOREL ,&A.Pkla)	France	Un modèle pour mesurer la résistance à la compression de blocs de terre comprimée avec le test de flexion en 3 point	Flexion	Test de flexion en trios points(BTCS)	
(Ouedraogo, Aubert, Tridout, & Escadeillas)	France	La stabilisation des brique de terre avec une faible teneur en ciment ou en chaux est-elle pertinente	deux type de terre et deux type de liants inorganiques . divers mélanges ont été préparés avec les sols et ces liants en utilisant des teneures massiques de (0% ,2%,4%)	La stabilisation des briques de terre à faible teneur en ciment ou en chaux (mois de 40%)	L'ajout de petites quantités de liant minéraux modifie considérablement le terre pour valeur tampon eau et humidité
(A.Lima, Vrarum, Sales, & f.Netto, 2012)	Brazil	Analyse des propriétés mécaniques de la maçonnerie en blocs de terre comprimée utilisant la cendre de bagasse de canne à sucre	Préparez deux lots de blocs avec 6% et 12%de ciment plus terre avec l'ajout de	Analyse de l'ajout de la bagasse cendre de canne à sucre aux blocs de terre compressée	La cendre de bagasse peut être incorporée dans les BTCS et la maçonnerie sans endommager les propriétés mécanique
(Tallah & Guettala, 2016)	Algérie	Les propriétés mécaniques et physiques du bloc de terre comprimée stabilisé à la chaux et chargé de fibres de palmier dattier non traitées et alcalines	sol concassé et sable comme matrice principale ,la chaux comme stabilisant des fibres de palmier en tant que matière fibreuse	Etude des propriétés mécaniques et physiques du BTC stabilisé à la chaux vive et chargé de fibres de palme	Les valeurs de résistance du BTC chargé de fibres traitées alcalines sont légèrement supérieures à celles des fibres non traitées

(Darshan C.Sekhar ;Sitaram Nayak;2018)	India	Utilisation de laitier et de ciment granulés de haut fourneau dans la fabrication de(BTCS)	Compression	L'utilisation du laitier granulé de haut fourneau et de ciment dans la fabrication de (BTCS)	Le BTCS préparé avec du (LGHF) et du ciment peuvent être utilisés dans la maçonnerie pour la construction de murs porteurs.
(Bing Qu, C.Jansen, W.Bland, & T.Laursen, 2015)	USA	Test de murs en blocs de terre compressée imbriqués à dominante flexion	Flexion	Résultats du test de comportement des murs des blocs de terre comprimée imbriqués contrôlés par flexion	Le mure ICEB la flexion peuvent présenter un comportement hystérétique stable jusqu'à ce une rupture ductile se produite . La ductilité du mur augmente avec l'augmentation du rapport hauteur /largeur lorsque les autres paramètres de conception restent les mêmes. La résistance du mur peut être améliorée en ayant un rebord à une extrémité ,et elle peut être réduite en ayant une ouverture
(A.Gutteal,A .Abibsi ;H.Ho uari 2005)	Biskra ,Algérie	Etude de durabilité du béton de terre stabilisée dans des conditions d'exposition à la fois de laboratoire et climatique	Constriction de 8 mures (15 cm d'épaisseur)	Etudier la possibilité d'améliorer significativement la résistance du terre en ajoutant plusieurs stabilisants	Le ciment et la résine ont un meilleur comportement de durabilité que les quatre stabilisateurs (ciment, chaux, ciment plus chaux et ciment plus

(Mansour, Jelidi, Cherif, & Jabrallah, 2016)	Tunisie	Optimisation des performances thermiques et mécaniques des blocs de terre comprimée (BTC)	Compression Mesure de la conductivité thermique du BTC par la méthode du fil chaud	Obtenir un BTC légers en faisant varier leur densité apparente afin de modifier leur porosité et par conséquent d'agir sur leur conductivité	La densité apparente a une forte influence sur le comportement thermique et mécanique du BTC .la diminution de la densité apparente du BTC s'est accompagnée d'une diminution significative de sa conductivité thermique et de son efficacité thermique
--	---------	---	---	--	---