

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : structure

Présenté par :

Lakouas Malika

Larbi Nour El Houda

Sujet du mémoire

L'usage de matériau terre dans le bâtiment

Soutenu publiquement le 05 /11/2020. Devant le jury composé de :

Mr, A. KRIM

Président

Mr, N. KERROUM

Encadreur

Mr, B. DJEBLI

Examineur

Mr, A. RABAHI

Examineur

PROMOTION : 2019/2020.



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **Allah** de nous avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser notre travail.

En second lieu, Nous tenons notre immense gratitude à nos parents pour leur accompagnement tout au cours de ce cycle d'étude.

Nous remercions de manière spéciale Monsieur **KERROUM NADIR** de nous avoir permis de réaliser ce projet et pour son encadrement ,son encouragement et sa grande patience.

Enfin, nous remercions les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail :

- **Mr. A. KRIM.**
- **Mr. B. DJEBLI.**
- **Mr .A. RABAHI.**

Résumé

La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau le plus proche celui que l'on a sous les pieds, disponible à peu près partout dans le monde. La brique en terre crue et la brique compressée, de même que le pisé, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction. Aujourd'hui encore, près de la moitié de la population mondiale vit dans un habitat en terre crue.

Pour mieux connaître les caractéristiques, le comportement de la terre et la Contribution de la production des blocs de terre comprimée en vue de les utiliser dans le bâtiment on a soumis le Bloc de Terre Comprimée aux essais à partie du sol de Chaâba El Hamra (M'Silla) par Des fibres naturelles (filasse de sisal) qu'ils été incorporées dans le Bloc de Terre Comprimée en différents pourcentages 0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5. Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des fibres dans l'argile stabilisée permet d'améliorer la résistance donc on peut dire que le matériau terre Peut concurrent le parpaing grâce à ses caractéristiques et sa disponibilité.

Mots clés :

Terre crue, argile, cohésion, fibres, brique de terre comprimée, résistance en compression, stabilisation.

Abstract

Earth is one of the oldest building materials because building in raw earth makes it possible to exploit the material closest to the one you have under your feet, available almost everywhere in the world. Mud brick and compressed brick, as well as rammed earth, are the most widely used earth construction techniques in the history of construction.

Even today, almost half of the world's population lives in a mud habitat.

To better understand the characteristics, the behavior of the earth and the Contribution of the production of compressed earth blocks for use in building, the Compressed Earth Block was subjected to tests from the soil of Chaâba El Hamra (M'silla) by Natural fibers (sisal yarn) that have been incorporated in the Block of Compressed Earth in different percentages 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5. The results obtained show that the incorporation of fibers into the stabilized clay makes it possible to improve the resistance so we can say that the earth material can compete with the concrete block thanks to its characteristics and its availability.

Key words:

Raw earth, clay, cohesion, fibers, compressed earth brick, compressive strength, stabilization.

ملخص

تعد الأرض واحدة من أقدم مواد البناء لأن البناء في الأرض الخام يجعل من الممكن استغلال المواد الأقرب للمادة الموجودة تحت قدميك، والمتوفرة في كل مكان تقريباً في العالم. يعتبر طوب الطين والطوب المضغوط، بالإضافة إلى الأرض المدكوكة، من أكثر تقنيات إنشاء الأرض استخداماً في تاريخ البناء.

حتى اليوم، يعيش ما يقرب من نصف سكان العالم في موطن طيني.

لفهم خصائص وسلوك الأرض بشكل أفضل ومساهمة إنتاج الكتل الترابية المضغوطة لاستخدامها في البناء ، تم إخضاع كتلة الأرض المضغوطة لاختبارات من تربة الشعبة الحمراء (المسيلة) بواسطة الألياف الطبيعية (خيوط السيزال) التي تم دمجها في كتلة الأرض المضغوطة بنسب مختلفة 0 ؛ 0.1 ؛ 0.2 ؛ 0.3 ؛ 0.4 ؛ 0.5 .

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن دمج الألياف في الطين المستقر يجعل من الممكن تحسين المقاومة لذلك يمكننا القول أن مادة الأرض يمكن أن تنافس الكتلة الخرسانية بفضل خصائصها وتوفرها.

الكلمات الدالة :

الأرض الخام، الطين، التماسك، الألياف، الطوب الأرضي المضغوط، قوة الضغط، التثبيت.

Table des matières :

Remerciements.....	2
Résumé	3
Abstract	4
ملخص	5
Table des matières :.....	6
Liste des figures :	11
Liste des tableaux :	13
Introduction générale	14
Problématique :	15
Objectifs	15
Hypothèses	15
chapitre.1 Généralité sur la construction en terre crue, ses caractéristiques, avantages et inconvénients.	16
1.1 Historique :.....	17
1.2 Construire en terre crue :	19
1.3 Le matériau terre :	19
1.3.1 Fractions granulométrique :	20
1.3.2 Stabilisation :	21
1.3.2.1 La stabilisation mécanique :	22
1.3.2.2 La stabilisation physique :	22
1.3.2.3 La stabilisation chimique :	22
1.3.2.4 Stabilisants de la terre à bâtir :	22
1.3.2.4.1 Les sables et graviers :	22
1.3.2.4.2 Les fibres :	22
1.3.2.4.3 Le bitume :	23
1.3.2.4.4 Les résines :	23
1.3.2.4.5 Le ciment :	23
1.3.2.4.6 La chaux :	24
1.3.3 Plasticité :	24
1.3.4 La cohésion :	25
1.4 Caractéristiques physiques de la terre crue :	25
1.4.1 Masse volumique :	25

1.4.2	Résistance mécanique :.....	25
1.4.3	Aspects thermiques :.....	25
1.5	Les avantages de la terre :.....	26
1.6	Les inconvénients :.....	27
1.7	Les différents types de construction en terre :.....	27
1.7.1	Le Pisé :.....	27
1.7.2	Le torchis :.....	28
1.7.3	La bauge :.....	29
1.7.4	L'adobe :.....	29
1.7.5	La brique de terre compressée (BTC) :.....	30
1.7.6	Enduit terre :.....	31
1.8	Conclusion :.....	31
chapitre.2	Présentation des techniques de la construction en terre.	32
2.1	Les techniques en terre crue :.....	33
2.1.1	La bauge :.....	33
2.1.2	L'adobe :.....	34
2.1.3	Le pisé :.....	35
2.1.4	Le torchis :.....	36
2.1.5	La BTC ou BTCS (brique de terre compressé) ou (brique de terre compressé stabilisée) ses caractéristiques et mise en œuvre :.....	37
2.1.6	Le damier :.....	38
2.1.7	La technique terre-paille :.....	39
2.1.8	Enduit terre :.....	39
2.2	Procédés constructifs en terre :.....	41
2.2.1	Les états hydriques du matériau :.....	41
2.2.1.1	La terre sèche :.....	41
2.2.1.2	La terre humide :.....	41
2.2.1.3	La terre plastique :.....	41
2.2.1.4	La terre visqueuse :.....	41
2.2.1.4.1	La terre liquide :.....	41
2.3	Les douze procédés constructifs :.....	41
2.3.1	La terre creusée :.....	41
2.3.2	La terre couvrante :.....	42
2.3.3	La terre remplissant :.....	42

2.3.4	La terre découpée :.....	42
2.3.5	La terre comprimée :.....	42
2.3.6	La terre façonnée :	43
2.3.7	La terre empilée (bauge) :.....	43
2.3.8	La terre extrudée :.....	43
2.3.9	La terre garnissage :.....	43
2.3.10	La terre coulée :	43
2.3.11	La terre paille :.....	44
2.3.12	La terre moulée :.....	44
2.4	Conclusion :	44
chapitre.3	Les Blocs de terre comprimée.....	45
3.1	Définition :.....	46
3.2	La construction en bloc de terre comprimée dans le monde :.....	46
3.3	Des outils de mise en œuvre :	47
3.4	Production des blocs de terre comprimée :	47
3.5	Diversités des produits de blocs de terre comprimée :.....	48
3.6	Composition :.....	49
3.7	Caractéristiques de bloc de terre comprimée :.....	49
3.7.1	Caractéristiques techniques :	49
3.8	Les techniques de construction en brique de terre compressée :	50
3.9	La fabrication du mortier :	51
3.9.1	Eau :.....	51
3.9.2	La terre :.....	52
3.9.3	Le liant :.....	52
3.9.4	Compactage :	52
3.9.5	Le moulage :	52
3.10	Construction d'un mur en briques de terre compressée :	52
3.10.1	Le poids :	53
3.10.2	Montage :.....	53
3.10.3	Les angles :	54
3.11	Les utilisations de la brique BTC :.....	54
3.12	Les Avantage de bloc de terre comprimée :	54
3.13	Diversités des produits de blocs de terre comprimée :.....	54
3.14	Revêtements :	55

3.14.1	Préparation :.....	56
3.14.2	Première couche :	56
3.14.3	Incisions :.....	56
3.14.4	Seconde couche « la finition » :.....	56
3.14.5	Tamponnement :.....	57
3.15	Conclusion :.....	57
chapitre.4	Le confort et les principales pathologies des constructions en terre.....	58
4.1	Le confort générer par l'utilisation la terre :.....	59
4.2	Les principales pathologies rencontrées sur le bâti en terre :	59
4.3	Conclusion :	60
	Partie expérimentale.....	61
	Introduction :	62
chapitre.5	Caractérisation et méthodes expérimentaux	63
5.1	Matériaux utilisés :.....	64
5.2	Caractérisation du sol étudié :.....	66
5.2.1	Analyse chimique :.....	66
5.2.2	Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :.....	66
5.2.3	Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057) :.....	69
5.2.4	Les limites d'Atterberg (NF P94-051) :.....	70
5.2.5	L'essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068) :	71
5.3	Conclusion :	72
chapitre.6	Elaboration d'un modèle expérimental des BTCS.	73
6.1	Confection des blocs :.....	74
6.1.1	Etapas de préparation :.....	74
6.1.2	Préparation des mélanges :	75
6.2	La cure des éprouvettes :.....	76
6.2.1	Essai de compression simple (la norme P 18-406) :.....	77
6.2.2	Essai de traction par fendage :	78
6.2.3	Essai de flexion :.....	79
chapitre.7	Les résultats.....	80
7.1	Les masses volumiques et les résistances :	81
7.1.1	L'effet des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.....	81
7.1.2	L'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression à 28j sur BTC :	82
7.1.3	L'effet des fibres sisal sur la résistance à la traction Rt à 28j de BTC :.....	82

7.1.4	L'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment :	83
7.2	Les diagrammes et les graphes donnés par logiciel Minitab :	85
7.2.1	Diagramme de Pareto des effets pour la masse volumique et la résistance à 7 et 28 jours	85
7.2.1.1	Diagramme de Pareto des effets pour la masse volumique :	85
7.2.1.2	Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 7 jours et 28 jours :	86
7.2.2	Les effets principaux pour la masse volumique et la résistance à 7 et 28 jours :	87
7.2.2.1	Les effets principaux pour la masse volumique :	87
7.2.2.2	Les effets principaux pour la résistance à 7 jours :	87
7.2.2.3	Les effets principaux pour la résistance à 28 jours :	88
7.3	Interactions des facteurs :	89
7.3.1	Les interactions entre les constituants pour la masse volumique :	89
7.3.2	Les interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours :	90
7.3.3	Les interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours :	90
7.3.4	Conclusion :	91
7.4	Résultats globaux :	92
7.4.1	La résistance à la compression :	92
7.4.2	La résistance à la traction :	92
7.5	Conclusion :	93
	Conclusion générale et recommandations :	93
	Référence	95

Liste des figures :

Figure 1: exemples anciens de constructions en terre.....	17
Figure 2: Exemples récents de construction en terre.	18
Figure 3: Distribution des constructions en terre dans le monde.....	19
Figure 4: Une construction faite en terre crue.....	19
Figure 5: Coupe dans la couche de terre.	20
Figure 6: Classification des grains.	21
Figure 7: Granularité continue de la terre.	21
Figure 8: La terre est un matériau recyclable.....	26
Figure 9: Construction en pisé.	28
Figure 10 : Mise en place du torchis.	28
Figure 11: Mur monolithique.....	29
Figure 12: Mélange coulé dans des moules en bois en forme de briques et cuit au soleil.....	30
Figure 13: Construction en BTC.....	30
Figure 14: Application d'un enduit terre.	31
Figure 15: Un putoir en bois et sabot de protection métallique.	36
Figure 16 : un arc.	39
Figure 17: Techniques de construction en terre.	40
Figure 18: La terre coulée, un béton de terre.	43
Figure 19: La roue des techniques constructives en terre crue.	44
Figure 20 : Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.....	46
Figure 21: Bloc de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle.....	47
Figure 22: Différents produits de blocs de terre comprimée.	48
Figure 23: Diversités des produits de blocs de terre comprimée.	55
Figure 24 : les remontées capillaires.....	60
Figure 25: Courbe granulométrique de la brique broyée.	64
Figure 26 : Fibres de filasse utilisées.....	65
Figure 27 : Argile n°1 Argile <i>rge</i> , Argile n°2 Argile <i>vrt</i> et Argile n°3 Argile <i>grs</i>	65
Figure 28 : Les deux types de ciment utilisé.....	66
Figure 29 : Courbe granulométrique d'argile <i>rge</i>	67
Figure 30 : Courbe granulométrique d'argile <i>vrt</i>	68
Figure 31 : Courbe granulométrique d'argile <i>grs</i>	68
Figure 32 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	69
Figure 33 : Appareillage d'essai.....	70

Figure 34 : Détermination de la limite de liquidité.....	71
Figure 35 : Appareillage d'essai.....	71
Figure 36 : Le malaxeur et l'extracteur mécanique utilisé.....	75
Figure 37 : Le Présurasse De Fabrication De BTC.....	75
Figure 38: Conservation des blocs au laboratoire et l'étuve utilisée pour la cure.....	76
Figure 39 : Presse hydraulique pour l'essai de compression et Le bloc après écrasement.....	78
Figure 40 : l'essai de traction par fendage.....	78
Figure 41 : L'essai de flexion d'après « CNERIB ».....	79
Figure 42 : Briques de terre comprimées et stabilisées.....	79
Figure 43: Graphe de l'effet des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.....	81
Figure 44 : Graphe de l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.....	82
Figure 45: Graphe de l'effet de la teneur en fibre sur la résistance à la Traction par Fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment.....	82
Figure 46 : Graph de l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment.....	83
Figure 47 : Diagramme des effets pour la masse volumique.....	85
Figure 48: Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 7 jours.....	86
Figure 49: Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 28 jours.....	86
Figure 50: Graphique des effets principaux pour la masse volumique.....	87
Figure 51 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 7 jours.....	87
Figure 52 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 28 jours.....	88
Figure 53: Diagramme des interactions entre les constituants pour la masse volumique.....	89
Figure 54 : Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours.....	90
Figure 55: Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours.....	90

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Différentes techniques de construction en terre. -----	40
Tableau 2 : Caractéristique de bloc de terre comprimé. -----	50
Tableau 3: Quantité de mortier selon l'épaisseur du mur. -----	52
Tableau 4 : Les masses volumiques de la brique broyée. -----	64
Tableau 5: Analyse chimique de l'argile rouge.-----	66
Tableau 6: Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>rgc</i> . -----	67
Tableau 7: Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>vt</i> .-----	67
Tableau 8 : Analyse granulométrique pour le type d'argile <i>grs</i> . -----	68
Tableau 9 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.-----	69
Tableau 10 : Les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 03 types des argiles.	70
Tableau 11 : Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche. -----	72
Tableau 12 : Les facteurs choisis.-----	76
Tableau 13 : Les masses volumiques du sol.-----	81
Tableau 14 : Les résultats des masses volumiques, les résistances mécaniques à 7 j et à 28 j des BTC.-----	84
Tableau 15 : Les résultats des masses volumiques, les résistances mécaniques à 7 j et à 28 j des BTC.-----	85

Introduction générale

La terre crue est utilisée depuis des millénaires comme matériau de construction, Avant l'arrivée massive de béton et des parpaings de ciment.

Les traditions constructives se faisaient et se défaisaient au gré de la disponibilité des matériaux naturels (bois, fibres végétales, minéraux, terre...).

Aujourd'hui, près d'un tiers des habitants de la planète vit dans les maisons de terre crue grâce à sa souplesse de mise en œuvre et son omniprésence, la terre permet une grande diversité architecturale.

Certaines constructions ont près de 900 ans, d'autres peuvent atteindre jusqu'à 10 étages.

En jouant sur son taux d'humidité, elle peut être utilisée de maintes façons :

Moulée : **adobe**.

Façonnée et tassée : **bauge**.

Alliée à des fibres végétales : **torchis**.

Damée ou comprimée : **pisé, brique en terre crue compressé**.

La terre crue peut également s'appliquer très facilement en enduit ou servir de mortier pour sceller un appareillage de pierre ou de terre.

Les murs de terre crue régulent naturellement le taux d'humidité grâce à leur porosité naturelle (le taux d'humidité est aussi important pour le confort et la salubrité d'un habitat que la température).

La terre crue permet le renouvellement naturel de l'air dans les habitations.

Les murs de terre, grâce à leur masse importante et leur inertie thermique nivellent, les écarts de température.

Ces qualités font que les maisons de terre crue sont confortables et agréables à vivre, dans certaines régions on les surnomme même (les maisons de centenaire).

La terre crue est plus que jamais d'actualité. Elle est en parfaite adéquation avec une démarche de construction écologique et éthique.

Problématique :

En effet le matériau terre nous en trouvons partout, en quantité illimitée et en différentes qualités et aussi doté des caractéristiques très supplémentaires. Il y a souvent accès de terre autour de nous que cela encombre même, mais que pouvons-nous faire ?

Pouvons-nous l'utiliser comme matériau industrialisé pour substituer les matériaux énergivores ?

Dans la perspective où le boom démographique n'est pas en phase avec la disponibilité de logement, d'où la crise au logement qui est grandissante de nos jours plus qu'hier en Afrique en particulier. Dans une Afrique au moins de 6 personnes sur 10 peuvent s'offrir une maison vu les coûts très élevés que cela engendre.

Objectifs

La terre comme un matériau de construction présente une tentative vers la réalisation d'un confort optimal, aussi une construction écologique respectueuse de l'homme et de l'environnement. L'objectif de cette étude consiste à rendre à la terre sa valeur comme un matériau de construction durable naturel, sain et confortable.

Hypothèses

- ✓ Le développement de la construction en terre crue en fait une alternative appropriée à l'avenir de la construction urbaine respectueuse de l'environnement.
- ✓ L'ajout de ciment, chaux et les fibres dans le matériau terre, à faible dosage limite sa sensibilité à l'eau et augmente ses propriétés mécaniques. Mais le recours à cette « stabilisation » reste critiquable car elle impacte l'intérêt écologique et pénalise le cycle de vie du matériau.

chapitre.1 Généralité sur la construction
en terre crue, ses caractéristiques,
avantages et inconvénients.

1.1 Historique :

La « terre » est utilisée comme matériau de construction depuis onze millénaires sur tous les continents [1]. Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments qui résultent de l'altération physique (fragmentation sans modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants. Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'Humanité. D'après l'UNESCO, 20% du nombre de site enregistrés comme patrimoine mondial sont entièrement ou partiellement construits en terre. Ceci témoigne du riche patrimoine architectural en terre crue. Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds. La ville syrienne de Tell Ferres de plus de 7000 ans ainsi que la Citadelle d'Ulug Dépé de plus de 5000 au Turkménistan sont quelques exemples (Figure 1). À l'Antiquité et au Moyen-âge, plusieurs constructions en terre ont été réalisées telles que la cité antique de Volubilis au Maroc, ou le grand Kyz Kala à Merv au Turkménistan [2] (Figure 1).



Figure 1: exemples anciens de constructions en terre.

De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Ferres en Syrie, citadelle d'Ulug Dépé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan [2].

Plusieurs constructions modernes en terre réparties aux quatre coins de la planète montrent la persistance de l'intérêt pour la construction en terre (Figure 2). Dans des régions rurales d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique, la terre a été et est toujours utilisée comme un matériau de

construction privilégié. Par contre, en Europe, comme dans d'autres pays industrialisés, la terre crue a perdu de plus en plus d'importance avec l'industrialisation au XIXe siècle. Il s'en est suivi une perte des savoir-faire. Suite à la crise énergétique des années 1980, la terre crue a peu à peu regagné l'intérêt des architectes. Mais la terre crue doit encore retrouver sa place dans la gamme des matériaux de construction existants.

Dans les pays en voie de développement, la terre crue est souvent considérée comme symbole de pauvreté. La construction en terre est remplacée par des constructions en béton, tôle et parpaing, considérées comme modernes et durables [3] ; [4] ; [1]. Dans le bâtiment, la terre peut être utilisée comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur.[5]



Figure 2: Exemples récents de construction en terre.

De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili, Al Ain à Abou Dhabi aux Emirats arabes unis créé en 1891 et restauré en 2008 ; le marché de Koudougou au Burkina-Faso construite en blocs de terre comprimée au début des années 2000 ; une école en pisé à Koné en Nouvelle Calédonie construite en 2017 ; quartier de 65 logements construit en 1985 principalement en blocs de terre comprimée et pisé à L'Isle-d'Abeau en France (TerraLyon, 2016).

1.2 Construire en terre crue :

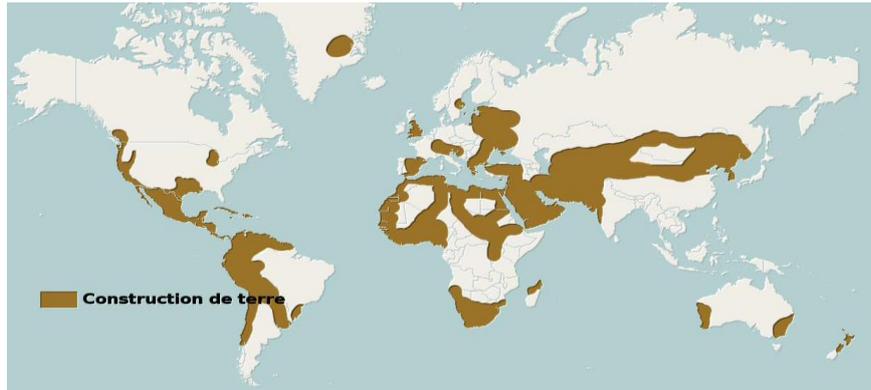


Figure 3: Distribution des constructions en terre dans le monde.

(Source : Inspiré de Blondel *et al.* (2003, p. 5))

La construction en terre crue, bien qu'elle représente encore aujourd'hui environ 1/3 de l'habitat mondial (**figure 3**), a tendance à laisser de plus en plus place à la construction en béton. Or, dans de nombreux pays, le béton n'est bien souvent pas le plus adapté aux conditions locales que ce soit pour des raisons économiques, thermiques ou encore écologiques (**Figure 4**). C'est ainsi le cas de l'Afrique.

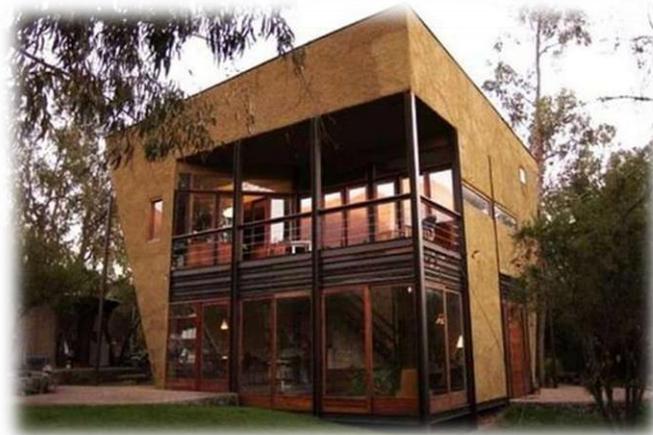


Figure 4: Une construction faite en terre crue.

(Source : <http://www.solidarite-afrique.lu/informationsutiles/1055>).

1.3 Le matériau terre :

La terre est composée de sable, de limons et d'argile. Il faut généralement creuser à 20 ou 30 cm de la surface, sous la terre végétale, pour trouver de la terre utile à la construction.

La **première couche** qui se dépose au fond du bocal est le **sable** (il peut y avoir une seule couche de sable ou deux, s'il y a deux épaisseurs de grains), la **seconde** correspond au **limon** (parfois en petite quantité qui ne se voit pas dans le bocal) et la **dernière** couche à se déposer est celle d'argile.

C'est par rapport au pourcentage d'argile dans une terre que l'on définit ses caractéristiques (riche en argile ou non).

Le taux d'argile dans une terre va donner la technique la plus adaptée à utiliser, car toutes les terres ne sont pas adaptées à toutes les techniques. Cela dit, les terres peuvent être modifiées. Si une terre est trop argileuse, on peut y ajouter du sable. Si elle est trop sableuse, on y ajoute un liant (chaux).

Pour stocker la terre, le mieux est de la mettre sous un toit avec des courants d'air (un hangar). Par contre, il vaut mieux éviter de la laisser sous une bâche, car elle se transforme vite en boue à cause de la condensation.

Le mélange eau et terre tamisée très liquide s'appelle la « barbotine ».

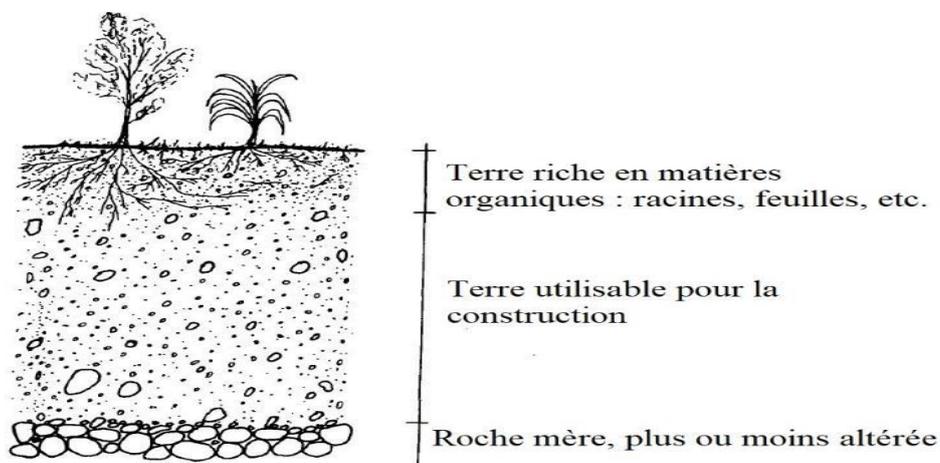


Figure 5: Coupe dans la couche de terre.

(Guérin, 1985, modifié).

1.3.1 Fractions granulométrique :

La terre est constituée de fractions de granulométries différentes, qui révèlent le degré de transformation de la roche-mère. On peut ainsi classer les grains de la façon suivante (Figure 6)

La proportion de ces constituants varie d'une terre à l'autre, ce qui conditionne son usage. À l'exception des argiles, tous ces composants sont des fragments de roche de tailles et formes différentes. Ils constituent le squelette granulaire de la terre et lui apportent leur rigidité. Les cailloux sont de formes angulaires ou arrondies et constituent la partie grossière de la terre. Les graviers, ronds ou anguleux également, « constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait » [6]. Les sables sont caractérisés par leur grande friction interne, leur structure ouverte et leur perméabilité. Les silts sont semblables aux sables mais sont de dimension inférieure.

Ils présentent un certain degré de cohésion interne dû à la présence de films d'eau entre les particules.

	Taille
Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 60 μm
Silts	entre 60 μm et 2 μm
Argiles	au-dessous de 2 μm

Figure 6: Classification des grains.

(Source : Anger & Fontaine, 2009 : pp. 102)



Figure 7: Granularité continue de la terre.

(Source : Anger & Fontaine, 2009 : p. 103)

1.3.2 Stabilisation :

Les constructions en terre présentent une vulnérabilité élevée face aux phénomènes d'érosion liés aux pluies, vents ou gels. L'enjeu est donc de les préserver en utilisant des techniques de stabilisation. La stabilisation a pour objectif d'améliorer la dureté (i.e., résistance aux chocs et aux frottements, réduction de l'effritement) et l'imperméabilité. Cependant un stabilisant ne remplace pas l'action du liant principal qui est l'argile [7].

La stabilisation de la terre consiste à lui donner des propriétés physiques « irréversibles ». Elle se fait en fonction de la conception du bâtiment, de l'économie du projet, de la durabilité et de la qualité du matériau. Il existe plus d'une centaine de produits stabilisants de la terre à bâtir. À chaque variété de terre correspond le(s) stabilisant(s) approprié(s) [7].

Il existe plusieurs procédés de stabilisation :

1.3.2.1 La stabilisation mécanique :

Consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure et plus particulièrement sur sa porosité, perméabilité, densité et compressibilité [8] Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules ainsi que les variations de volume du matériau (gonflement-retrait à l'eau). En ce qui concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore la résistance à l'érosion (**du vent et de la pluie**). La stabilisation améliore les liens entre les particules, ce qui augmente la résistance à la compression [7].

1.3.2.2 La stabilisation physique :

Consiste à modifier la texture de la terre en mélangeant des grains de tailles différentes [7].

1.3.2.3 La stabilisation chimique :

Consiste à mélanger la terre à d'autres matériaux ou des produits chimiques.

La stabilisation n'est pas une obligation. Elle n'est, par exemple, pas nécessaire lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau. Elle a en outre un coût important sur le prix de revient du matériau. Elle doit de ce fait tenir compte « des propriétés de la terre à stabiliser, des améliorations à envisager, de l'économie du projet et des délais de réalisation, de la maintenance et de son coût, des techniques de construction mises en œuvre » [8].

1.3.2.4 Stabilisants de la terre à bâtir :

1.3.2.4.1 Les sables et graviers :

Permettent de structurer la terre trop argileuse en donnant un squelette au matériau. L'argile joue alors le rôle de liant. L'ajout de sable ou de gravier à la terre est donc un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité [9]. Il permet également d'utiliser moins d'argile et ainsi d'épargner les gisements.

1.3.2.4.2 Les fibres :

Sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale (poils et crins de bétail), végétale (les pailles, les balles de céréales, le chanvre, les fibres de noix de coco, de palmier, ...) ou synthétique (acier, fibres de verre, cellophane). La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle s'adapte à l'état plastique, visqueux, et même à la compression. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction. Elle contribue à la résistance de la terre à l'échelle du grain, mais n'interagit pas directement avec les plaquettes d'argile, à l'échelle microscopique.

L'ajout des fibres permet :

- « d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- d'accélérer le séchage grâce aux canaux de fibres qui agissent comme un drainage de l'humidité vers l'extérieur. Inversement la présence de fibres augmente l'absorption d'eau ;
- d'alléger le matériau en allégeant sa masse volumique et en améliorant ses propriétés d'isolation ;
- d'augmenter la résistance à la traction ».

L'efficacité de la stabilisation aux fibres dépend des caractéristiques de la terre et des interactions entre les fibres et la terre. La terre stabilisée aux fibres présentera une bonne résistance à la fissuration, au cisaillement, et à la compression, et une meilleure capacité d'absorption d'énergie sismique [8].

1.3.2.4.3 Le bitume :

Est un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérosène, naphtha) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. Il permet d'imperméabiliser en entourant les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et fissures. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité [8].

1.3.2.4.4 Les résines :

Dérivent souvent de substances végétales comme par exemple de résidus du traitement du bois au cours de la fabrication de la pâte à papier. La résine est un hydrophobe qui réduit la sensibilité de la terre à l'eau [8].

1.3.2.4.5 Le ciment :

Est considéré comme un liant inorganique, et le meilleur stabilisant des BTC [8]. Le ciment permet d'enchaîner : il crée une liaison inerte qui s'oppose à tout mouvement. Il améliore la résistance à l'eau en créant des liens entre les particules de sables et graviers. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses [7]. Cinq ou 6% de ciment suffiraient pour avoir des résultats satisfaisants [7]. La stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait et du gonflement et nécessite peu d'eau. Le ciment diminue cependant la conductivité thermique de la terre. Plus il y aura de ciment dans un bloc de terre, plus la conductivité thermique se rapprochera de celle du ciment. L'inconvénient du ciment demeure son coût de production élevé et la nécessité des gisements calcaires.

La présence d'oxydes de fer qui favorisent les réactions pouzzolaniques ou un indice de plasticité faible < 20 % (terres sableuses) sont des paramètres d'efficacité pour l'utilisation du ciment. Par

contre, la matière organique, une eau chargée en sel, la présence des sulfates ou une terre trop argileuse (> 20 % d'argile) seraient des paramètres néfastes à l'utilisation du ciment comme stabilisant [8] ; [7].

1.3.2.4.6 La chaux :

Permet de former des liaisons chimiques stables entre les particules d'argiles. La chaux aérienne vive (CaO) ou la chaux éteinte Ca(OH)_2 sont utilisées pour les travaux routiers. Elles réagissent positivement avec les terres argileuses et nécessitent une teneur en eau relativement élevée qui dépend de la quantité de chaux utilisée. La chaux interagit avec les argiles et peu avec les sables. En général, la chaux ne convient pas pour la stabilisation des BTC qui nécessitent peu d'eau et des terres sableuses [9]. La chaux aérienne diminue le retrait et le gonflement, augmente la résistance à la compression, diminue la sensibilité à l'eau, la masse volumique sèche et la plasticité [9] ; [7]. La chaux nécessite des gisements calcaires mais demande moins d'énergie que le ciment pour sa fabrication.

Il existe un dosage optimal pour chaque terre. La quantité de chaux pour stabiliser la terre est de l'ordre de 6 à 12 % en général. Une terre argileuse (jusqu'à 70%) est favorable à l'utilisation de la chaux. Par contre, la présence des sulfates ou de matière organique est néfaste [9].

1.3.3 Plasticité :

La plasticité est la capacité de maintenir une déformation des matériaux sans se rompre. Elle est une technique de cohérence des sols. La plasticité est similaire avec les briques d'Adobe et la bauge, en affectant l'utilisation de brique de terre crue demande un volume de liquide limité et un indice de plasticité important comparé aux techniques de construction plus sèche. En générale, le bon type de terre de construction demande un indice de plasticité compris entre 16 à 33% et une limite de liquidité entre 31 à 50%. [10]

La teneur et la nature des argiles des sols déterminent largement leurs caractéristiques géotechniques. Le test le plus simple pour déterminer la présence d'argile est le test au bleu de méthylène qui donne une indication sur la teneur en argile des sols et matériaux. Dans une autre approche, l'échantillon de sol est soumis au test d'Atterberg. Ce test permet de déterminer la sensibilité d'un échantillon de sol à l'eau sans passer par l'analyse minéralogique de sa partie fine [11].

1.3.4 La cohésion :

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $\Phi < 2$ mm) qui lie les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante [12] :

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

La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide. [13]

1.4 Caractéristiques physiques de la terre crue :

1.4.1 Masse volumique :

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre. Elle varie 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 à la suite d'une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors typiquement 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.

1.4.2 Résistance mécanique :

La terre crue est un matériau s'apparentant au béton. Du point de vue mécanique, elle fonctionne comme ce dernier, uniquement en compression ; les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles. La terre mise en œuvre de manière monolithique (pisé, bauge) a généralement une résistance à la compression d'environ 20 kg/cm² (2 MPa). 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 elle reste néanmoins négligeable.

1.4.3 Aspects thermiques :

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas un matériau isolant. En revanche, elle possède une excellente inertie thermique. Cela se traduit par une régulation des différences de températures

intérieures (en été, dans un habitat en terre crue, il fait plus frais le jour car le mur se rafraîchit la nuit, rendant cette fraîcheur le jour). Voici quelques valeurs, pour une terre à $1\,500\text{ kg/m}^3$:

- conductivité thermique : $0,75\text{ W/m}\cdot\text{°C}$;
- chaleur spécifique : $900\text{ J/kg}\cdot\text{°C}$;
- capacité thermique : $1,350\text{ kJ/m}^3\cdot\text{°C}$
- effusivité thermique : $1,00\text{ J}/(\text{racine carrée de la capacité thermique})\cdot\text{m}^2\cdot\text{°C}$.

Ainsi, un pisé à $2\,000\text{ kg/m}^3$ possède une capacité thermique de $1\,800\text{ kJ/m}^3\cdot\text{°C}$. [14]

1.5 Les avantages de la terre :

La terre crue est un matériau de construction doté de nombreux avantages :

Abondante, matériau écologique, ressource renouvelable locale nécessite peu d'énergie pour sa fabrication (**Figure 8**), énergie grise quasi nulle (ressources à proximité et fabrication sur site).

Ne produit aucun déchet, présente une densité élevée donc des qualités d'inertie thermique, régule l'hygrométrie de l'aire intérieur et constitue un isolant phonique performant.

Offre une grande liberté architecturale, joue le rôle de thermostat (garde la fraîcheur l'été et emmagasine la chaleur l'hiver), la fabrication de l'adobe requiert beaucoup moins d'énergie que la chaux, les briques cuites ou le ciment et ne génère surtout pas de CO_2 , vu que la terre est disponible localement y'a pas besoin de transport qui est une grande cause de pollution, rapidité de réalisation. La terre en construction est utilisée sous forme crue, cuite, stabilisé, compriméEtc. Cela va des caractéristiques de résistance. Les murs sont généralement porteur ici. Pour des BTC soit brique en terre comprimé nous pouvons construire jusqu'à R+3, sachant pourquoi ce matériau voir ce type de construction reste très peu connu et pas beaucoup mis en œuvre.

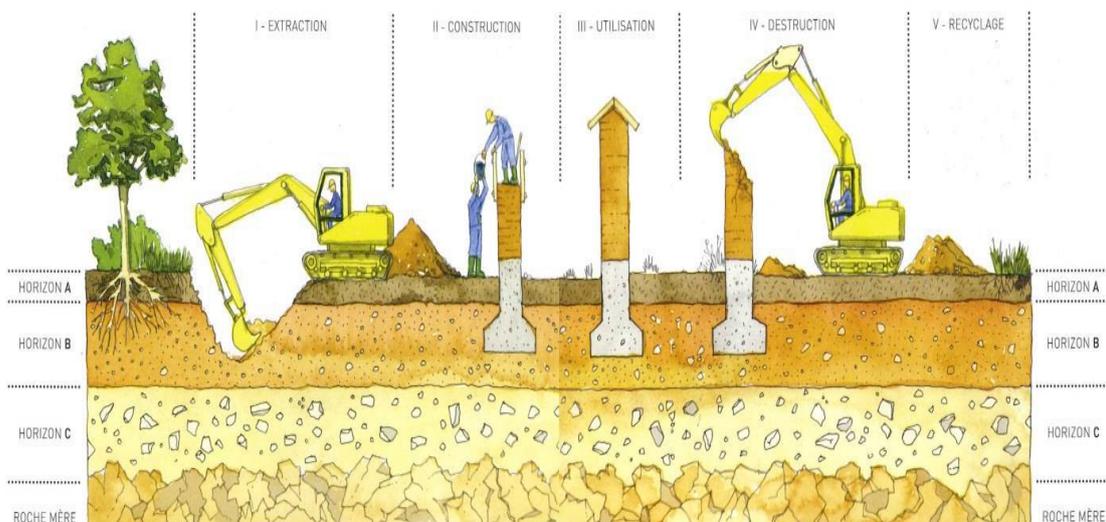


Figure 8: La terre est un matériau recyclable.

(Source : Anger & Fontaine, 2009 : pp. 100-101)

1.6 Les inconvénients :

- Vulnérable à l'eau, il faut donc protéger les murs à leurs bases et aux points hauts (**bonnes bottes et bon chapeau**).
- La liaison entre les particules est d'ordre physique, en contact avec l'eau elles se fragilisent et même se neutralisent ce que 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 au deux mais elle reste faible.
- La facilité de son érosion sous l'action de l'eau.
- Le matériau terre ne possède aucune adhérence avec le bois, qui provoque des découlements autour des ouvertures.
- Main d'œuvre nombreuse et qualifiée, pouvant engendrer un surcoût par rapport à un système industriel.
- Mise en œuvre lente avec un temps de séchage, plus ou moins long.
- Main d'œuvre nombreuse et qualifiée, pouvant engendrer un surcoût par rapport à un système industriel.

1.7 Les différents types de construction en terre :

1.7.1 Le Pisé :

Terre crue comprimée dans des coffrages (**banche**) ; atouts de pisé : sa capacité thermique et sa perspirante, c'est-à-dire sa capacité à réguler la vapeur d'eau, son faible cout, développement durable, ... (Figure 9).

a. 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-a-dire qu'il a une bonne capacité a stocké la chaleur et a la restituer par rayonnement.
- ✓ Isolation phonique et qualité acoustique.
- ✓ Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire. [15]



Figure 9: Construction en pisé.

(Source : Google image)

1.7.2 Le torchis :

Mélange de terre grasse et de paille (ou foin) ou de chanvre coulé dans des clayonnages (pieux et branches soutenant le torchis) à l'image de la construction à ossature – bois ; atouts de torchis :

Bonne isolation thermique et phonique, faible cout, développement durable,... (figure 10)

a. Les avantages du torchis :

- Plus solide que la terre crue seule.
- Séchage rapide.
- Financièrement plus économe que les autres types de terre crue. [16]



Figure 10 : Mise en place du torchis.

Source : <http://www.echo62.com/article-reprendre-leflambeau-du-torchis/>

1.7.3 La bauge :

Une technique très écologique et économique ; murs monolithiques composés uniquement de terre liée par de la paille (également crin, morceaux de tissus, tessons,.....etc.) ; atouts de la bauge : beaucoup de liberté dans la construction, pas de coffrage, murs courbes, très bonne inertie,....

- **Les avantages de la bauge :**
- Qualité plastique de matériau.
- Pas besoin de coffrage (pisé), ni d'armateur (torchis). [16]



Figure 11: Mur monolithique.

Source : <http://www.echo62.com/article-reprendre-leflambeau-du-torchis/>

1.7.4 L'adobe :

Mélange homogène d'argile, d'eau, de fibres végétales ou animales coulé dans des moules en bois en forme de briques et cuit au soleil ; un des matériaux de construction les plus utilisés au monde et le plus ancien ; atouts de l'adobe : faible cout, très bonne inertie thermique, facilité d'utilisation,.... (Figure 12).

a. Les avantages de l'adobe :

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

- ✓ Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- ✓ D'emmagasiner la chaleur.
- ✓ Réduire la consommation d'énergie.
- ✓ De ne produire virtuellement aucune pollution.
- ✓ Construction peu couteux.
- ✓ N'entraîne pas la production de gaz. [17]



Figure 12: Mélange coulé dans des moules en bois en forme de briques et cuit au soleil.

(Source : Pierre DELOT, les adobes, 2015.)

1.7.5 La brique de terre compressée (BTC) :

Version moderne de l'adobe avec en plus la présence d'un liant hydraulique (chaux ou ciment), la brique de terre crue est compressée mécaniquement afin d'ôter l'air et la rendre plus résistante ; atouts de la BTC : très bonne inertie, résistance, bonne isolation, bon régulateur d'humidité

a. Les Avantages de bloc de terre comprimée :

- BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- 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.
- BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²).
- 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.
- 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. [18]



Figure 13: Construction en BTC.

(Source : Google image)

1.7.6 Enduit terre :

Un enduit terre est une beauté incomparable, ce matériau est de plus fantastique car est une régulateur d'hygrométrie dans l'habitat (taux d'humidité), inertiue (capacité à stocker les frigories et calories et à les restituer dans le temps). [12]



Figure 14: Application d'un enduit terre.

(Source, Hubert Guillaud, traité de construction en terre.)

1.8 Conclusion :

La terre crue est matériau doté de nombreux avantages : elle est abondante, nécessite peu d'énergie pour sa fabrication, ne produit aucun déchet, présente une densité élevée donc des qualités d'inertie thermique, constitue un isolant phonique performant. Différents techniques emploient la terre crue comme matériau structurel : le pisé (murs coffrés à partir de banche), la bauge (terre crue empilée), l'adobe (briques associées à de la paille), les briques de terre compressées. Elle peut également être utilisée comme matériau de remplissage et d'isolation dans le torchis, la terre-paille et la terre-copeaux bois, enfin, elle permet de formuler des enduits.

chapitre.2 Présentation des techniques de la construction en terre.

la terre crue peut être moulée ou comprimée sous opération de caisson comme la terre cuite suivant sa composition, la terre crue peut être utilisée de différentes manières en construction : adobe, torchis, pisé, BTC (blocs de terre comprimé), enduit.

2.1 Les techniques en terre crue :

Il existe différentes techniques de construction en terre crue selon les contextes géographiques, les modes de vie, les coutumes locales, le climat ainsi que les matériaux disponibles. [8] ont répertorié 12 techniques principales de construction en terre crue (Figure 17 et Tableau 1). Les cinq techniques de construction les plus répandues dans le monde sont présentées ci-dessous, à savoir le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et le bloc de terre comprimée (BTC).

2.1.1 La bauge :

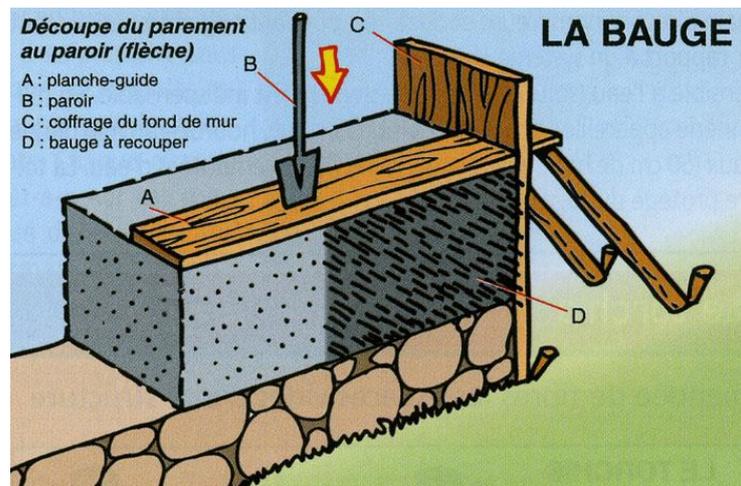
Technique la moins connue, elle est très rarement mise en œuvre dans le neuf, en raison de la contrainte des délais de mise en œuvre.

Ce système très “ rustique ” consiste à empiler, tasser, puis façonner des fourchées de terre amendée de végétaux. Moins courant que les autres techniques, il se retrouve en milieu rural, dans le quart nord-ouest de la France, notamment en Normandie, souvent associé au torchis. Les bâtisses en bauge atteignent 1 ou 2 niveaux, murs monolithiques de 50 à 80 cm d'épaisseur, enduits ou non. Une maison débutée au printemps est achevée à l'entrée de l'hiver. Elle doit sécher pendant des mois avant d'être habitable. L'enduit, facultatif, est traditionnellement posé une à plusieurs années après. De la bauge préfabriquée, en gros blocs moulés, assemblés avec une grue, a donné lieu à quelques constructions neuves en Ille et Vilaine et dans la Manche.

- La terre extraite est épierrée, étalée et mouillée. Elle est malaxée jusqu'à devenir une pâte à laquelle on mélange des fibres. Le mélange est foulé plusieurs fois aux pieds, avant d'être apporté à l'endroit choisi.

- après appareillage d'un soubassement haut de 30 à 90 cm, des fourchées de mélange sont déposées sur celui-ci, à plat ou en oblique, avec un débord d'environ 5 cm. La levée est achevée lorsque toute la longueur du mur est garnie, sur 60 à 90 cm de haut. Les débords sont tassés à coup de trique (simple bâton). Après une à quatre semaines de séchage, le retrait, 2 à 3 cm, est effectué.

- Debout sur la levée, le maçon installe un cordeau ou une planche à l'aplomb du soubassement. Il retire l'excédent de terre en taillant le flanc du mur à l'aide d'un paroir (bêche plate à long manche, au bord affûté), ou, de nos jours, d'un coupe-foin, longue lame métallique. Comme pour le pisé, les ouvertures sont ménagées pendant la construction ou découpées après séchage, selon les régions. [19]



2.1.2 L'adobe :

- Densité de 1,4 à 1,8 T/m³ - Sol argilo-sableux, avec une bonne proportion de sable.
- Les dimensions classiques sont celles des briques : 22cm de long, 10,5 cm de large et 5 cm de haut (ou encore 28 x 13,5 x 5, ou 40 x 20 x 8,5, etc.).

L'adobe Est d'origine arabe. Le taux d'argile dans la terre doit être de **20/30 %**. Elle se travaille à l'état « plastique », c'est-à-dire avec de l'eau. Une brique d'adobe est une brique de terre moulée (dans un moule en bois) à la main et séchée à l'aire quelques jours. Le séchage est déconseillé en plein soleil car les briques ont tendance à se fendre. Aujourd'hui, on rajoute de la paille à la préparation du mélange est d'environ 60 litres de terre pour **10 litres** de paille. Une brique d'adobe standard fait **43*28*5/10 cm**, mais toutes les tailles sont possibles, à partir de **16 cm** de long. On fabrique les briques d'adobe sur un terrain plat. Mieux vaut ajouter une couche de sable pour que les briques ne se collent pas au sol. On les fabrique généralement de mai à juillet car il leur faut un mois de séchage. Mais après seulement **4/5 jours**, on les redresse pour que l'air circule. On doit sabler le moule pour qu'elles ne collent pas, mettre la terre à l'intérieur et tasser les coins. On démoule alors aussitôt avant de laver le moule (immédiatement) après **02 semaines**, on peut les entasser selon une disposition précise avant de les bâcher pour les protéger de la pluie. Pour la mise en œuvre des briques, il faut les tremper dans l'eau avant de les poser si elles sont trop sèches. Le mortier est composé uniquement de terre (un peu moins argileuse que celle utilisée pour les briques), sauf sur les premières rangées où il vaut mieux le réaliser en chaux pour éviter les remontées capillaires. Il s'applique à la main, sans aucun matériel. La proportion du mélange pour le mortier (avec une terre à **25%** d'argile) est d'environ **2 volumes** de sable pour un volume de terre. Pour les parois intérieures, il est intéressant de remplacer les deux premières rangées par des briques de terre cuite pour éviter les problèmes avec la serpillerie, tout en remplaçant les plinthes.

Pour répartir les forces de la charpente, il faut installer des poutres sablières au sommet des murs. Briques d'adobe de différentes tailles petites briques retournées après **2 jours** avec leurs moules en bois Grosses briques pas suffisamment sèches.

2.1.3 Le pisé :

Le pisé est un mode de construction en terre crue, comme l'adobe ou la bauge. On le met en œuvre dans des coffrages appelés banches. La terre est idéalement graveleuse et argileuse, mais on trouve souvent des constructions en **pisé** réalisées avec des terres fines.

- Densité : 1,7 à 1,9 T/m³.

- Sol à texture sableuse ou sablo-graveleuse. Un sol limoneux ou argilo-sableux convient aussi.

- La terre, malaxée et humidifiée (8 à 12 % d'eau) est entreposée à proximité. Elle n'est pas amendée. Actuellement, le transport de la terre et son malaxage sont mécanisés. Le pisé est parfois stabilisé à la chaux hydraulique naturelle. La prise, plus rapide, s'effectue alors sous bâche plastique, en 2 ou 3 semaines.

- La terre est compactée dans un coffrage. Le coffrage (banche) est composé de 2 panneaux en bois, (actuellement en contreplaqué ou aggloméré) longs de 2 à 4 m et hauts de 80 à 100 cm. Il est posé à cheval sur le soubassement, maintenu par des clefs qui seront noyées dans la maçonnerie puis retirées lors du décoffrage. Avec un fond de banchage (planche fermant une des extrémités), la banchée est arrêtée verticalement. Avec une banche simple, le raccord de banchée sera en biais.

- Une première couche de terre de quelque 12 cm est jetée dans la banche, compactée aux pieds puis damée en 2 passages, par un ou deux pisoirs.

- Un nouveau lit de terre est ajouté, et ainsi de suite. La banchée est achevée lorsque la terre compactée atteint l'arase supérieure du coffrage. Celui-ci est démonté aussitôt et remonté à la suite. Chaque nouvelle banchée est posée à cheval sur deux autres de la couche inférieure.

La première levée (couche de terre) est terminée lorsque le tour du bâtiment est réalisé.

La levée suivante est posée lorsque le retrait de la précédente est achevé (en 1 ou plusieurs jours). Les ouvertures sont ménagées au fur et à mesure, par des cadres en bois placés dans le coffrage, ou percées dans le mur terminé, à l'emplacement défini par les cadres et linteaux noyés dans le pisé au cours de sa réalisation. Afin de limiter l'érosion et/ou " d'accrocher " un enduit de finition à la chaux, un mortier de chaux, résistant aux intempéries est souvent associé, sur 5 à 12 cm d'épaisseur, au pisé.

Après restauration, un nouvel enduit à la chaux faiblement hydraulique est, la plupart du temps, posé pour uniformiser l'aspect, isoler et protéger le pisé. Il est mis en œuvre à la truelle, en 2 ou 3 couches, en respectant les temps de prise.

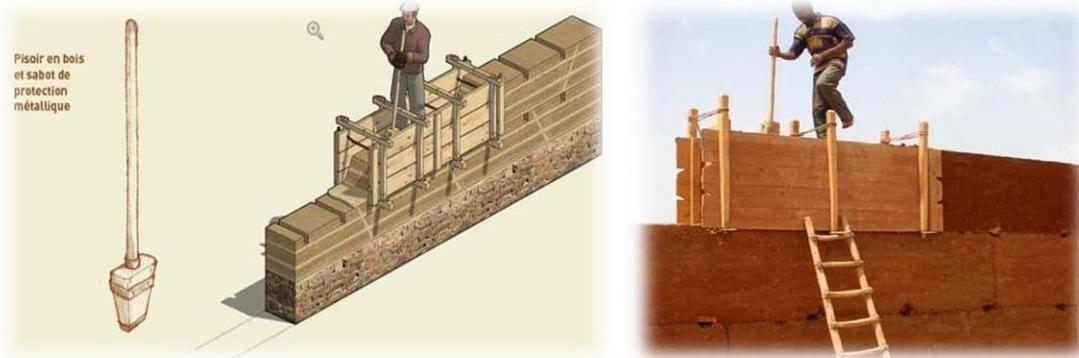


Figure 15: Un pisoir en bois et sabot de protection métallique.

(Source : pise-livradois-forez.org).

Le taux d'argile dans la terre doit être d'au moins **20%** (un peu comme l'adobe).

2.1.4 Le torchis :

Le torchis est un matériau de remplissage non-porteur. C'est un béton naturel qui est utilisé pour les murs et les cloisons dans les constructions à ossature en bois qui est aussi utilisé pour faire des plafonds. Sec, il est très résistant mais ne résiste pas bien à l'humidité. La technique est appliquée verticalement mais aussi horizontalement, pour un torchis d'isolation dans un plancher en bois. Le mur obtenu, léger, n'a que 8 à 15 cm d'épaisseur. Il est mis en place une fois la toiture achevée. Les nombreuses zones de contact et sa faible épaisseur, le rendent peu isolant.

- La terre est foulée, mouillée et étalée au sol. Mise à l'état de pâte molle (20 à 35 % d'eau), elle est amendée de fibre végétale hachée (orge, seigle, blé, lin...) mais aussi animal. Malaxé et remouillé, le mélange (le plus souvent des torches de paille liée à de l'argile ou un mélange paille terre eau) repose 1 à 2 jours.

- La nature du torchis dépend du type de colombage qu'il va combler : le soubassement reçoit des colombes dont la section détermine l'épaisseur du mur de torchis. L'espacement de ces poteaux (10 à 80 cm), la présence et le nombre d'écharpes (pièces de contreventement posées de biais) définissent la mise en œuvre.

- Trois types de support de torchis se rencontrent, parfois simultanément dans la même localité : les pans de bois à éclisses (éclats de bois insérés de biais), les structures garnies de palançons (pièces de bois verticales) et celles dotées d'un clayonnage, ou recouvertes de lattis.

- Les éclisses servent de structure d'accroche aux torches de paille enduites de torchis.

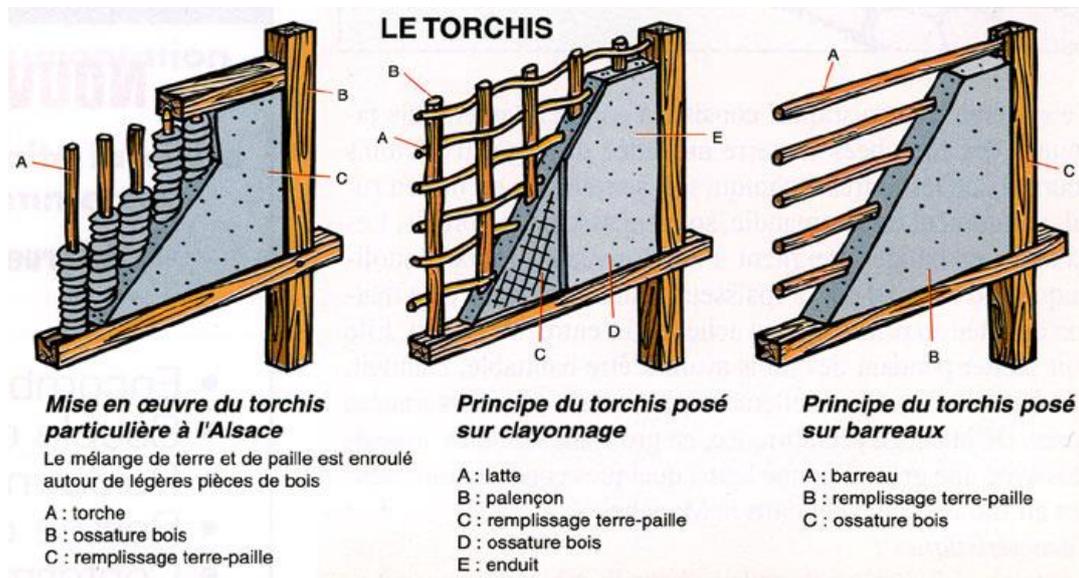
- Les palançons sont entrelacés avec des baguettes (clayonnage). Ils servent de treillage au mélange.

- Le lattis est installé sur les 2 faces du mur et sert de coffrage au torchis. Après séchage, le lattis est couvert du même mélange.

- Le treillis est mouillé avant d'être garni, à la main ou à la truelle, de bas en haut et des extrémités vers le centre. Le tout est lissé.
- La première face garnie sèche une journée, avant que la seconde face du mur ne soit remplie du torchis, qui s'accroche sur la première couche.
- Plusieurs passages permettent de boucher la fissure due au retrait.
- Des stries sont réalisées à l'extérieur avant séchage, afin d'accrocher l'enduit ultérieur, posé un à deux mois plus tard. Cet enduit à la chaux est mis en œuvre à la truelle, après humidification du support. Il peut couvrir le bois, ainsi protégé.

Les importants délais de mise en œuvre font que le torchis traditionnel n'est utilisé que pour les réhabilitations. Il existe des torchis prêts à l'emploi sur lattis, qui peuvent être projetés à la machine. De nouvelles techniques d'isolation se rapprochent du torchis, avec des végétaux préparés et liés à la chaux hydraulique, comme le mortier de chanvre. Les murs, épais de 40-50 cm, sèchent en 3 à 4 semaines. Le mortier de chanvre est aussi de plus en plus utilisé comme isolant intérieur.

Les constructions de terre crue abritent environ 30 % des habitants de la planète. D'un site à l'autre, les caractéristiques du sol varient. On prélève la terre de construction entre 20 et 40 cm en dessous de la surface afin d'éviter une interférence de la matière organique dans la qualité du matériau. Celui-ci peut être épierré, amendé, stabilisé avec un liant, généralement de la chaux hydraulique, qui permet de conserver à la terre sa capacité de transfert de l'humidité.



2.1.5 La BTC ou BTCS (brique de terre compressé) ou (brique de terre compressé stabilisée) ses caractéristiques et mise en œuvre :

Le BTC se trouve principalement en Afrique, en Américain du sud et en Asie. C'est une technique récente que l'on rencontre surtout sur des projets humanitaires car les organismes financent les machines utiles à la fabrication des briques. Le taux d'argile dans la terre doit être de

15/20 % d'argile. Il peut y avoir des cailloux jusqu'à 1.5 cm de diamètre dans la terre. Pour la BTCS, on stabilise en générale à 3 ou 4 % de chaux hydraulique ou de ciment. La proportion du mélange (avec une terre à 25 % d'argile) est donc d'environ 80kg de terre et 20 kg de sable pour 4 kg de ciment.

Les dimensions de briques que l'on trouve le plus fréquemment sont : 29.5*14*9.5 : 8 kg la brique pour 33 briques au m² ;

22*10.5*6.8 : 4 kg la brique pour 50 briques au m² ;

30*20*10 : 13 kg la brique pour 26 briques au m² ;

La compression moyenne d'une brique est d'environ 25 kg/cm². Sa densité est d'environ 1.9. Contrairement à la BTC, ou (BTCS) est que, pour les mêmes caractéristiques que les autres techniques, on réduit considérablement les épaisseurs de mur. La BTCS est moins fragile, plus dure que la BTC. La fabrication des BTC se fait à l'aide d'une machine spécifique. Avec la compression des briques **2m³** de terre se transforme en **1m³** de BTC. Pour les BTC, on peut les mettre en place tout de suite, même s'il est préférable de les laisser sécher quelques jours pour ne pas abimer les angles, car une **BTC** est assez fragile. Pour les **BTCS**, on les stocke, empilées et bâchées, sur des palettes. On réalise alors une « cure humide » : on arrose les briques tous les **2-3 jours** : pendant **6** semaines pour le ciment. Puis le séchage dure entre **2 et 6 mois** (les bâches).

La fabrication des briques à la chaux au ciment est déconseillée en été car il fait trop chaud et il est alors difficile de réalisé correctement la cure humide. Un mur porteur doit faire au minimum

20 cm de largeur. Avant de les poser, il faut mouiller les briques afin qu'elles se collent plus facilement. Le mortier peut se faire à la terre ou à la chaux. Mais le joint final se fait toujours à la terre pour un aspect esthétique, car les **BTC** ou (**BTCS**) sont rarement enduites. Dans ce cas, il est intéressant de passer (au pinceau) une cire d'abeille incolore pour protéger des poussières. Pour faire les joints, il est conseillé de laisser dépasser le mortier lors de la pose. Puis à l'aide d'une truelle, on gratte ce qui dépasse. Pour terminer, avec d'une éponge, on régularise les surfaces pour rendre homogène les joints. La **BTC** ou **BTCS** à l'avantage de permettre de nombreuses formes : niches, arcs (figure 16), frises ... Tout comme l'adobe, mieux vaut remplacer les premières rangées par des briques de terre cuite.

2.1.6 Le damier :

Est une technique importée d'Italie, de la région d'Abrus. On en trouve dans le sud de Gers. C'est une alternance de blocs de terre et de gros galets qui donne un rendu particulièrement esthétique et original.



Figure 16 : un arc.

(Source : Google image)

2.1.7 La technique terre-paille :

Est une technique moderne réalisée sur une ossature en bois le mélange utilisée comprend plus de paille que dans le torchis. Pour le préparer, on tamise la terre à **1.5 cm**, puis on la jette dans la bétonnière avec de l'eau. Il est important de toujours remuer pour que l'argile reste en suspension. On sort la boue que l'on met dans une remorque dans la quelle on rajoute la paille (imprégnée d'eau). On laisse alors le mélange s'imprégner une nuit avant de l'utiliser. Il faut faire un coffrage entre les poteaux d'ossature et y tasser la terre-paille. Puis les banches sont retirées immédiatement. L'intervalle entre les poteaux peut être plus grand que dans le torchis et comme on n'installe pas de tiges en bois. La largeur moyenne d'un mur est de **28 cm** pour un poids de 200/300 kg/ m³. [20]

2.1.8 Enduit terre :

La préparation de la terre peut se faire suivant deux modes :

- **Le mode sec** : la terre est broyée, tamisée : le mortier préparé avec cette poudre sèche et l'eau devra reposée avant l'application pour une bonne ouvrabilité de la terre.
- **Le mode humide** : la terre est mélangée à de l'eau, la barbotine obtenue et tamisée ; l'utilisation de cette pate humide ne nécessite pas de repos du mortier avant l'application.

La mise en œuvre :

Suivant l'exposition de la façade, l'état du support, l'effet recherché, plusieurs couches sont appliquées :

- ✓ Le renformis : rebouchage de trous, comblement de manques, permet les préparations du support.
- ✓ Le gobetis : couche de préparation pour l'accrochage du corps d'enduit.
- ✓ Le corps d'enduit : couche qui constitue l'enduit proprement dit.

- ✓ La finition : donne l'aspect définitif de l'enduit, texture et couleur.
- ✓ Le badigeon : autre mode de finition plus légère.

L'application de ces différentes couches peut se faire manuellement ou pour certaines à la machine de projeter. [21]

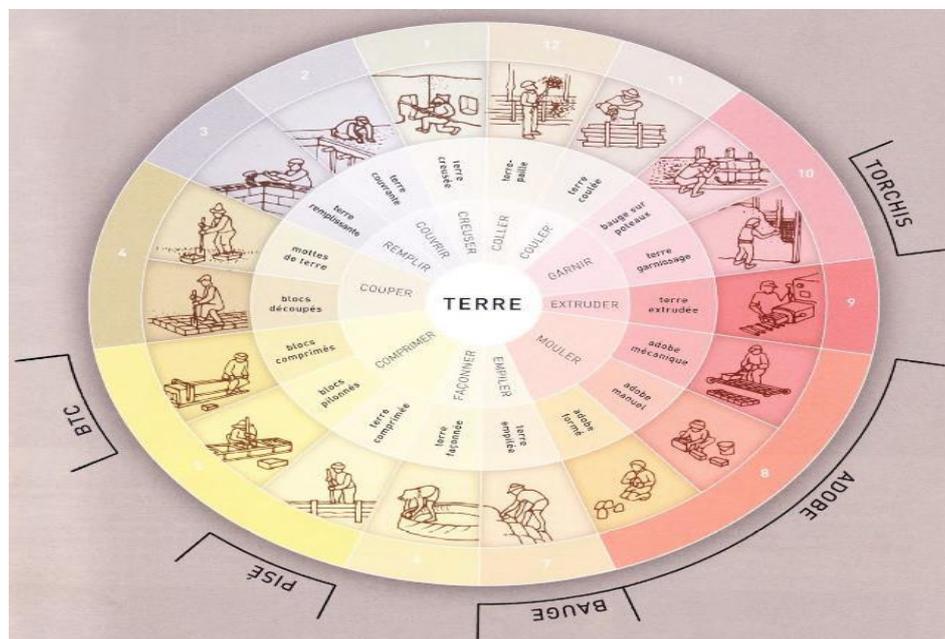


Figure 17: Techniques de construction en terre.

(Source : Anger & Fontaine, 2009).

Techniques	Descriptions
Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol
Terre recouvrant	Terre qui recouvre une structure construite avec un autre matériau
Terre remplissant	Terre qui remplit une enveloppe faite de matériaux creux
Terre découpée	Blocs de terre directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Terre comprimée dans des moules ou des coffrages
Terre façonnée	Terre façonnée à l'état plastique à la main
Terre empilée	Boules de terre empilées en murs épais
Terre moulée	Terre moulée dans des moules de formes diverses
Terre extrudée	Terre extrudée à l'aide d'une machine
Terre coulée	Terre coulée dans un coffrage ou un moule
Terre –paille	Matériau léger constitué d'une barbotine argileuse liée aux fibres
Terre garnissant	Terre mélangée aux fibres qui garnit en couches minces un support

Tableau 1 : Différentes techniques de construction en terre.

(Source : Houben et Guillaud, 1989)

2.2 Procédés constructifs en terre :

2.2.1 Les états hydriques du matériau :

Quelque soit la technique de construction en terre utilisée, sa mise en œuvre doit suivre l'état hydrique ou bien la teneur en eau de la terre. Les états hydriques du matériau terre [4] sont :

2.2.1.1 La terre sèche :

Teneur en eau (0-5%) : lorsque la terre sèche se présente sous forme de blocs ou d'agrégats, elle ne peut être brisée sans outil. Inversement, sous forme de poudre, elle ne peut être agglomérée : l'eau est ingrédient essentiel pour transformer la matière terre en matériau.

2.2.1.2 La terre humide :

Teneur en eau (5-20%) : lorsque la terre est désagrégée et pulvérisée, son toucher donne une sensation d'humidité, mais elle ne peut être façonnée par manque de plasticité.

Un critère pratique est donné pour identifier l'état humide, celui qui consiste de former une boule en comprimant fortement la terre entre les mains. Cette boule friable se brise en morceaux lorsqu'elle est lâchée sur le sol.

2.2.1.3 La terre plastique :

Teneur en eau (15-30%) : à l'état plastique, la terre est malléable comme de la pâte à modeler. Il est facile de façonner une boule de terre qui ne colle pas aux doigts.

2.2.1.4 La terre visqueuse :

Teneur en eau (15-30%) : une terre à l'état visqueux colle aux doigts mais ne coule pas. Il est très difficile, voir impossible, de former une boule avec cette terre.

2.2.1.4.1 La terre liquide :

Sous forme de barbotine, la terre est complètement dispersée dans l'eau et constitue un liant très liquide, coulant.

Un mélange va passer par différents stades de plasticité, à mesure qu'on le mouille.

Sec → humide (BTC, pisé) → plastique (adobe) → visqueux (enduit) → liquide.

2.3 Les douze procédés constructifs :

Hugo Houben et **Hubert Guillaud** recensent les différentes techniques de construction en terre et les représentent dans le schéma technique qui suit (figure 19) :

2.3.1 La terre creusée :

Ce procédé permet une protection contre la chaleur diurne et amortit la différence de température entre le jour et la nuit grâce à l'effet de volant thermique. Ce procédé présente deux variantes : le troglodyte horizontal ou les cavités sont creusées sur des points verticaux, et le troglodyte vertical

creuse dans des sites plats de plateaux ou de plaines. Les maisons sont à la fois, abritées des vents dominants, aérées et remarquablement tempérées.

2.3.2 La terre couvrante :

Utilisée aussi bien dans les régions chaudes que froides, elle profite du caractère isolant de la terre. Elle compte deux variantes : la maison enterrée ou la terre ne rentre pas dans la structure de la construction, mais elle couvre le bâti, et la maison recouverte de la terre qui pose le problème de l'humidité.

2.3.3 La terre remplissant :

La terre est utilisée en remplissage de matériaux creux : blocs de béton, matériaux textiles empilés, éléments isolants, qui constituent l'enveloppe porteuse ou non du bâtiment. [22]

2.3.4 La terre découpée :

Des blocs de terre sont directement découpés dans le sol [23]. Les blocs ou les mottes de terre sont extraites avec un outillage très simple (bêche, pioche, outils de carrière). Cette technique pose les problèmes de tassement des murs.

2.3.5 La terre comprimée :

On la trouve sous deux formes :

a. La brique compressée :

elle consiste à comprimer la terre qui a la même teneur en eau que la terre utilisée dans le pisé, dans un moule en acier ou en bois, de la même taille que d'une brique, à l'aide d'une presse manuelle, mécanique, hydraulique ou pneumatique. Le compactage se fait soit de manière statique ou dynamique. Les pressions de compactage entre 5 et 10 kg/cm² sont suffisantes, entre 10 et 20 kg/cm² sont excellentes, les pressions supérieures sont superflues et engendrent un gaspillage d'énergie, et entraînent parfois la détérioration des qualités mécaniques des blocs par l'apparition de laminage.

b. Les blocs monolithiques ou le pisé :

Cointe réaux a défini le pise comme étant « un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir avec aucune pièce en bois, et sans mélange de paille, ni de bourre. Il à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur ordinaire des murs de moellons, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battu, elle se lit, prend de la Consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations »

2.3.6 La terre façonnée :

Elle consiste à modeler la terre à l'état humide sans l'utilisation d'un coffrage ou d'un moule. Elle est utilisée dans les pays africains, et dans les régions équatoriales.

2.3.7 La terre empilée (bauge) :

La terre empilée ou « bauge », est l'un des quatre procédés constructifs les plus connus. Selon la fiche technique de l'Eco bâtiment : fiche matériau « la terre crue, torchis, pisé, bauge » publiée en Juillet 2010, la bauge : « est une technique de façonnage directe qui nécessite une terre un peu plus argileuse que la terre à pisé et d'avantage humidifiée. L'ajout de fibres végétales assez courtes permet d'améliorer la résistance en traction et surtout de réduire le retrait et les risques de fissuration. Le mélange est entassé sur place par levées de 60 cm puis, après séchage de un à plusieurs jours, la façade est dressée par coupe, battage ou même coffrage. »

2.3.8 La terre extrudée :

La terre est extrudée à l'aide d'une machine puissante.

2.3.9 La terre garnissage :

Elle consiste à appliquer la terre sur un support, en bois cloue ou entrelace, de façon à le recouvrir. Ce procédé regroupe deux variantes :

a)- le torchis : Un mélange de terre argilo-limoneuse et de fibre végétales, est utilisé comme matériau de remplissage dans les maisons.

b)- la bauge sur poteau .

2.3.10 La terre coulée :

La terre coulée (figure18), également appelée « pisé coulé », est un mélange très graveleux utilisé pour la reprise en sous-œuvre de murs en pisé ou pour la réalisation d'éléments non porteurs (cloisons, remplissages, etc.) elle est un béton de terre, réalisée et mise en œuvre de manière similaire à un béton de ciment. Elle est composée de granulats et d'une pâte d'argile pour les lier entre eux [24].



Figure 18: La terre coulée, un béton de terre.

(Sources : Horsch & de Paoli, 2014 ; <http://www.construction21.org/>)

2.3.11 La terre paille :

Comme son nom indiqué, le terre-paille est un mélange de terre et de paille utilise en remplissage de murs comme isolant écologique. Comme la majorité des isolants, ce n'est pas un matériau porteur, il y a donc besoin d'une structure qui assure la rigidité de la construction, une structure bois de préférence [25].

2.3.12 La terre moulée :

Elle consiste à mouler une brique de terre crue sans compactage puis séchée à l'air libre pendant quelques jours. La terre utilisée ne doit être ni très argileuse pour éviter les fissures, ni très sableuse afin d'assurer la cohésion. [26]

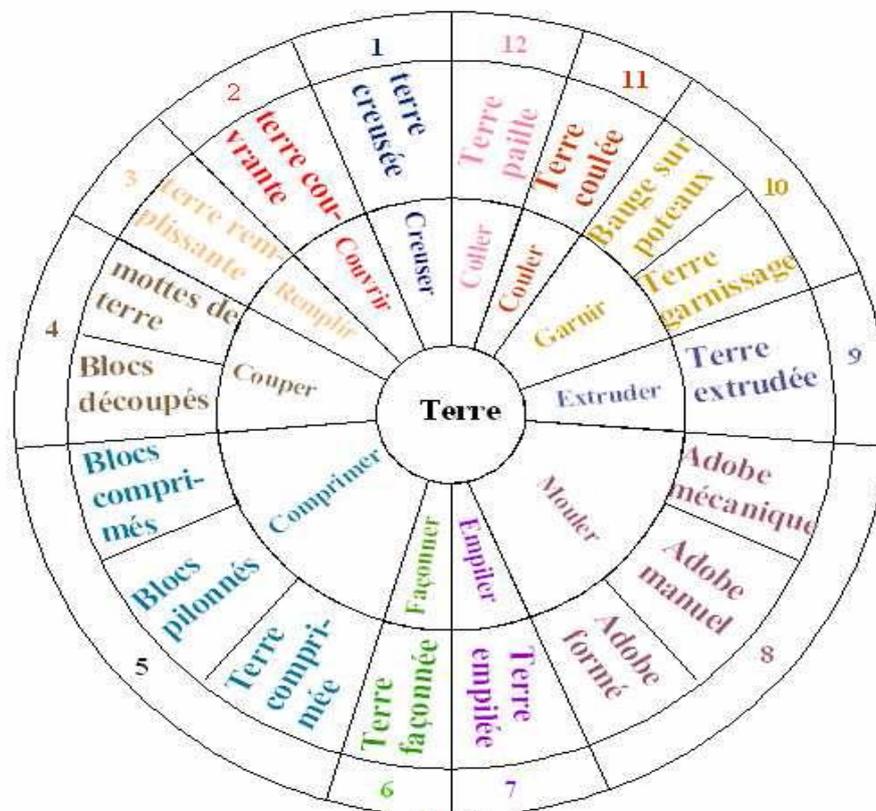


Figure 19: La roue des techniques constructives en terre crue.

(Source : "Bâtir en terre", P 26).

2.4 Conclusion :

La terre crue est sans doute le matériau de construction le plus écologique qui soit : disponible localement, très faible impact environnemental, cout extrêmement réduit et confort souvent inégalable, à condition de savoir la mettre en œuvre. Ces techniques aussi vieilles que le monde refont surface depuis une trentaine d'année notamment grâce à CRATerre.

chapitre.3 Les Blocs de terre comprimée.

3.1 Définition :

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie, des dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique photos (figure 21) de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. Les blocs de terre comprimée ont généralement un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés, à relief verticale ou horizontal. Les blocs de terre comprimée sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre (gravier, sable, limon et argile) ; un additif tel que de (ciment, chaux, pouzzolane ...etc.) peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques

Final des BTC dépendent de la qualité des matières premières de (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure).

3.2 La construction en bloc de terre comprimée dans le monde :

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde (voir figure 20), profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples fascinants : Casbah, sud(Maroc), Mosquée de Djenné (Mali), château escoffier) France) et Mausolée(Inde).



Figure 20 : Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.



Figure 21: Bloc de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle.

(Source : CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies.)

3.3 Des outils de mise en œuvre :

La fabrication des BTC nécessite 3 étapes de transformation :

- **Le criblage**, qui permet de séparer les gros cailloux et le gravier de la « poudre de terre » avec laquelle sont fabriquées les briques.
- **Le malaxage**, à la terre criblée est ajouté un liant (chaux, ciment...etc.) et de l'eau, le mélange doit être parfaitement homogène.
- **Le pressage**, qui moule la brique à la forme voulue.

Pour réaliser ces opérations, Mec-Concept propose 3 outils : un cribleur, un malaxeur et une presse. Ces machines ont été voulues robustes, simples, faciles d'entretien et de dépannage, tant sous l'aspect mécanique, qu'hydraulique et électrique.

3.4 Production des blocs de terre comprimée :

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. 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. [27]

3.5 Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, la marche accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Voir figure 22) :

a. Blocs pleins :

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

b. Blocs creux :

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs.

Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

c. Blocs alvéolaires :

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

d. Blocs à emboitements :

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

e. Blocs parasismiques :

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

f. Blocs spéciaux :

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique. [13]



Figure 22: Différents produits de blocs de terre comprimée.

(Source : TAALLAH Bachir, thèse de doctorat en science (Etude du Comportement Physico-mécanique de bloc de terre comprimée avec fibres.), Biskra 2014).

3.6 Composition :

Blocs de terre comprimée (argile, limon, sable), habituellement présents sous forme naturelle. Blocs de terre comprimée (argile, limon, sable) avec ajout de 5 % de chaux. Blocs de terre comprimée résistant à l'eau avec une charge de CO₂ très faible. Environ la moitié des émissions de CO₂ libérées pendant la production de la chaux est finalement réabsorbée par la chaux dans le bloc de terre comprimée. [28]

3.7 Caractéristiques de bloc de terre comprimée :

3.7.1 Caractéristiques techniques :

La BTC est une brique fabriquée à partir de terre crue compresser fortement. Elle est parfois adjuvante de ciment pour la stabiliser.

Voici ses principales caractéristiques :

1. Matériau porteur : la brique de terre compressée est un matériau de construction à part entière. Sa résistance à l'écrasement est très performante (de 60 à 120 kg au cm²).

2. Régulateur thermique et hygrométrique : la brique de terre compressée possède une incomparable inertie. Son déphasage thermique de 8 à 12h permet le maintien d'une température constante dans la maison, ainsi qu'un taux d'humidité régulé. Murs capteurs-accumulateurs, murs Trombe, poêles de masse... les maisons en terre sont des maisons à basse consommation d'énergie, adaptées aux nouvelles normes **BBC** (Bâtiment Basse Consommation) prévues pour 2012 et **BEPOS** (Bâtiment à Energie Positive) pour 2020.

3. Sain et naturel : une maison en terre est une maison qui « respire » et garantit un confort optimal pour ses occupants.

4. Ecologique et recyclable : que ce soit dans sa phase de fabrication (pas de cuisson), ou de mise en œuvre (simple mortier de sable et de chaux), la BTC est extrêmement faible consommatrice d'énergie.

5. La brique de terre absorbe le bruit, les ondes magnétiques et les odeurs.

6. Finition lisse, contact souple et chaleureux : la brique de terre peut être laissée apparente en intérieur.

7. Parasismique : la brique de terre est "élastique" (ductile) et se déforme en compression et cisaillement. Associée à un matériau résistant à la tension (le bois par exemple) elle donne des résultats très probants.

8. Richesse architecturale de formes, de lignes, de textures et de lumières. De nombreuses possibilités s'offrent à vous pour personnaliser votre maison.

9. Ses dimensions standards : On les trouve souvent de 9,5cm x 14,5cm x 30 cm pour environ 8 kilos.

Mais il existe des briques de parement moins épais, jusqu'à 5 cm. [29]

On résume les caractéristiques de bloc de terre comprimée dans le tableau suivant : [30]

Caractéristiques	Bloc de terre comprimée
Masse volumique (kg/m ³)	1200 – 1700
Résistance à la compression (MPa)	< 2,4
Résistance à la traction (MPa)	-
Conductivité thermique λ (W/m. °C)	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique (J/Kg. °C)	-
Capacité thermique (KJ/m ³ . °C)	-
Absorption d'eau (%)	10 - 20
Isolation acoustique (dB)	- 50 DB pour 40 cm - 40 DB pour 20 cm
Retrait au séchage (mm/m)	0.2 - 1

Tableau 2 : Caractéristique de bloc de terre comprimé.

3.8 Les techniques de construction en brique de terre compressée :

Il existe deux sortes de briques : la Brique de Terre Compressée (BTC) et la Brique de Terre Compressée Stabilisée (BTCS).

La BTC se trouve principalement en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie.

C'est une technique récente que l'on rencontre surtout sur des projets humanitaires, car les organismes financent les machines utiles à la fabrication des briques.

Le taux d'argile dans la terre doit être de 15 à 20 %. Il peut y avoir des cailloux jusqu'à 1,5 cm de diamètre dans la terre.

Pour la BTCS, on stabilise en général à 3 ou 4 % de chaux hydraulique ou de ciment. La proportion du mélange avec une terre à 25 % d'argile est donc d'environ 80 kg de terre et 20 kg de sable pour 4 kg de ciment.

Les dimensions de briques que l'on trouve le plus fréquemment sont :

– 29,5 x 14 x 9,5 : 8 kg la brique pour 33 briques au m² ;

- 22 x 10,5 x 6,8 : 4 kg la brique pour 50 briques au m² ;
- 30 x 20 x 10 : 13 kg la brique pour 26 briques au m².

La compression moyenne d'une brique est d'environ 25 kg/cm². Sa densité est d'environ 1,9. Contrairement à la BTC, la BTCS contient un stabilisant, un liant : de la chaux ou du ciment. L'avantage de la BTC comme de la BTCS est que, pour les mêmes caractéristiques que les autres techniques, on réduit considérablement les épaisseurs de mur. La BTCS est moins fragile, plus dure que la BTC. La fabrication des BTC se fait à l'aide d'une machine spécifique.

Avec la compression des briques, 2 m³ de terre se transforme en 1 m³ de BTC. Pour les BTC, on peut les mettre en place tout de suite, même s'il est préférable de les laisser sécher quelques jours pour ne pas abîmer les angles, car une BTC est assez fragile.

Pour les BTCS, on les stocke, empilées et bâchées, sur des palettes. On réalise alors une « cure humide » : on arrose les briques tous les 2-3 jours pendant un temps plus ou moins long selon le liant utilisé :

- pendant 6 semaines pour la chaux hydraulique,
- pendant 2 semaines pour le ciment.

Puis **le séchage dure entre 2 et 6 mois** (sans les bâches). La fabrication des briques à la chaux ou au ciment est déconseillée en été, car il fait trop chaud et il est alors difficile de réaliser correctement la cure humide.

Un mur porteur doit faire au minimum 20 cm de largeur. Avant de les poser, il faut mouiller les briques afin qu'elles se collent plus facilement. **Le mortier peut se faire** à la terre ou à la chaux. Mais le joint final se fait toujours à la terre pour un aspect esthétique, car les BTC ou BTCS sont rarement enduites. Dans ce cas, il est intéressant de passer (au pinceau) une cire d'abeille incolore pour protéger des poussières.

Pour faire les joints, il est conseillé de laisser dépasser le mortier lors de la pose. Puis à l'aide d'une truelle, on gratte ce qui dépasse. Pour terminer, avec d'une éponge, on régularise les surfaces pour rendre homogène les joints. [31]

La BTC (ou BTCS) a l'avantage de permettre de nombreuses formes : niches, arcs, frises...

3.9 La fabrication du mortier :

Selon la quantité nécessaire, le mortier sera fabriqué à la main ou à la bétonnière.

3.9.1 Eau :

Une brique comprimée avec beaucoup d'eau perd de la résistance et peut fissurer. Avec peu d'eau la compactage est difficile et perd aussi de la résistance. L'humidité optimale est de 4 à 5 % d'eau.

3.9.2 La terre :

Le mortier sera à base de terre et stabilisé par ajout de chaux hydraulique (de préférence au ciment) afin d'améliorer sa résistance mécanique.

La terre est plus sablonneuse que celle utilisée pour la fabrication des BTC et ne contient pas de gravillons (<3 mm).

Si on utilise la même terre que celle qui a servi à fabriquer les BTC, il faut la tamiser pour enlever les gravillons et rajouter du sable.

3.9.3 Le liant :

La quantité de liant hydraulique représente 10 à 15% du volume de terre mis en œuvre. En principe, il faudrait multiplier le rapport ciment/terre (ou chaux/terre) qui a servi à la fabrication des BTC par 1,5. Ainsi pour un mur avec des BTC à 6% de ciment de stabilisation, le mortier devrait contenir 6x1,5 soit 9% de liant.

Le mortier ne doit pas être trop liquide car cela provoquerait un retrait trop important et une moins bonne qualité d'adhésion.

3.9.4 Compactage :

Le compactage ou presse de la brique permet d'éliminer les vides entre les grains. Le volume compacté est d'environ 2/3 du volume foisonné.

Consommation selon le type de mur :

Epaisseur du mur	Quantité de mortier au m ² (joints de 12 à 15 mm)
Mur de 14 cm (1 brique)	28-32 litres
Mur de 30 cm (2 briques)	45-50 litres
Mur de 45 cm (3 briques)	65-75 litres

Tableau 3: Quantité de mortier selon l'épaisseur du mur.

3.9.5 Le moulage :

La brique de terre crue compressée (BTC) est fabriquée à l'aide d'une presse avec de la terre criblée (tamisée) légèrement humidifiée à de l'eau de pluie filtrée.

Il est possible d'ajouter un additif, de l'ordre de 10 % en volume, constitué de chaux.

3.10 Construction d'un mur en briques de terre compressée :

Un mur en BTC doit être isolé de l'humidité du sol, donc bâti sur un soubassement isolant et qui empêche les remontées d'humidité « de bonnes bottes...».

3.10.1 Le poids :

Un mur en BTC est relativement lourd. Une brique 29x14x9 pèse environ 8kg. Un mur simple parement pèsera plus de 290g/m² et un mur de 30 cm d'épaisseur fera environ 580kg/m². Et si le mur fait 2,50 m de hauteur, la charge linéaire sera de 1450 kg/ml.

Il faut donc s'assurer que le plancher ou la fondation destinée à supporter ce mur soit à même de résister à cette charge et aux autres charges éventuelles, si ce mur est utilisé pour appuyer un plancher par exemple. Une étude technique est alors indispensable.

3.10.2 Montage :

Si l'élancement est de 20 pour une maçonnerie classique, l'expérience des bâtisseurs en briques de terre a amené à considérer qu'il valait mieux se contenter d'un élancement de 10 pour la BTC. Ainsi un mur de 30 cm d'épaisseur fera au plus 3.00 m de hauteur.

Le plan de pose de la brique est légèrement humidifié. La brique est « graissée » de mortier sur les faces jointives et elle est plaquée sur le lit inférieur et contre la précédente.

Les joint sont garnis et lissés au fur et à mesure avec un fer à joint.

Il est important de veiller à ce que le mur soit protégé d'un soleil trop ardent ou du vent ce qui aurait pour effet de produire un séchage trop rapide du mortier sans que le processus d'adhésion avec les briques soit achevé.

Pendant toute la construction le dessus du mur sera protégé de la pluie lors des interruptions de chantier (nuit, w-e, etc.) pour éviter toute infiltration.

En cas d'impossibilité de protection, il est conseillé de remettre la construction à un moment plus favorable.

L'épaisseur des murs en BTC va dépendre de sa destination et des briques utilisées.

En format le plus courant, soit 29,5x14x9 cm, le mur pourra faire :

- 14 cm d'épaisseur (une seule brique en panneresse) « **Panneresse** : la brique est une panneresse quand son grand côté est apparent ».
- 29, 5 d'épaisseur, soit une brique en boutisse ou 2 briques en panneresse. « **Boutisse** : la brique est une boutisse quand son petit coté est apparent ».
- 45 cm d'épaisseur, soit une panneresse et une boutisse.

En 14 cm d'épaisseur, le mur ne peut alors que servir de cloison non porteuse (règle de l'élancement).

3.10.3 Les angles :

Les angles sont traités avec des briques en $\frac{3}{4}$, de façon à ce que la règle concernant la superposition des joints soit respectée. Les $\frac{3}{4}$ peuvent être obtenues par sciage de briques courantes ou au marteau de maçon.

Les angles sont des éléments essentiels d'une maçonnerie, la jonction de 2 murs assure leur stabilité. Il est donc essentiel que cet assemblage soit efficace et pérenne de façon à remplir cette fonction.

Les angles sont aussi plus souvent soumis à l'usure que les parements (chocs, fuite des descentes de gouttières). Aussi sont ils souvent traités avec des matériaux plus résistants tels que la pierre ou la brique cuite.

Les angles peuvent aussi être réalisés en BTC, mais il faut s'assurer de la qualité du soubassement et des fondations et prévoir leur protection contre une usure prématurée. [32]

3.11 Les utilisations de la brique BTC :

- Murs porteurs (< 2 étages).
- Cloisons.
- Stockage thermique.
- Voûtes et escaliers sur voûte.
- Mobilier intérieur.

3.12 Les Avantages de bloc de terre comprimée :

- BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- 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
- BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²)
- 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.
- 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. [33]

3.13 Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Houben, 2006) (voir figure 22) :

- **Blocs pleins :**

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

- **Blocs creux :**

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs.

Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

- **Blocs alvéolaires :**

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

- **Blocs à emboitements :**

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

- **Blocs parasismiques :**

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

- **Blocs spéciaux :**

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.

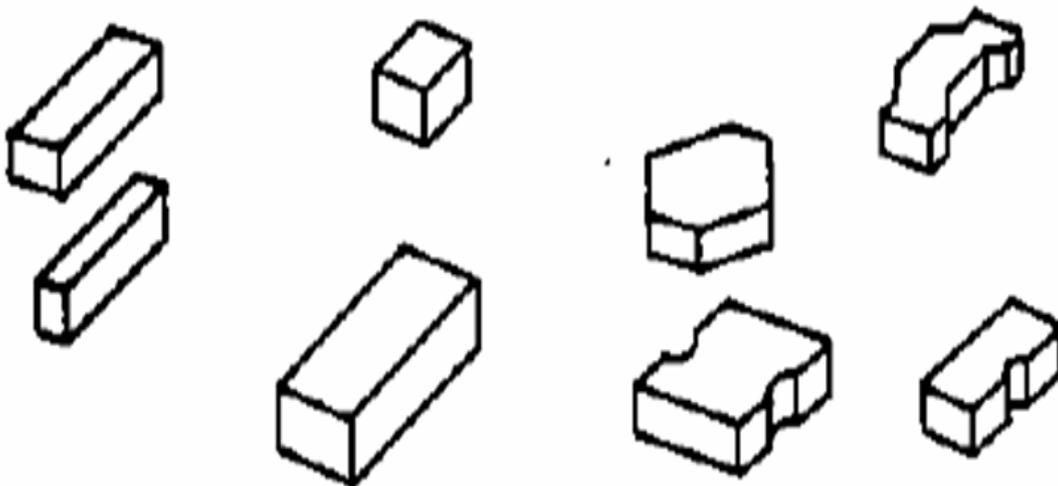


Figure 23: Diversités des produits de blocs de terre comprimée.

3.14 Revêtements :

Traitement appliqué sur la surface de la paroi afin de la protéger des effets néfastes du climat et de l'utilisation. Les revêtements servent aussi à rehausser l'allure esthétique du bâtiment.

Une paroi protégée par un revêtement sera mieux à même de résister à un séisme. [34]

Le travail de réalisation des revêtements de mur comprend plusieurs étapes :

3.14.1 Préparation :

Nettoyer le mur afin d'éliminer les particules isolées de terre et de sable et garantir l'adhérence du remplissage à la trame du mur. Si on décide d'humidifier le mur, il faut attendre un certain temps afin que le mur puisse évaporer et absorber l'eau jusqu'à l'intérieur.

3.14.2 Première couche :

Elle sert à niveler les imperfections du mur et à recevoir la couche de finition. L'épaisseur de cette couche est de 8 à 20 mm. Le mortier doit avoir les proportions suivantes :

1 part de terre argileuse à 5 mm de diamètre.

2 parts de sable (qui passe le tamis de 5 mm).

1/3 de paille coupée à 3 cm de long.



3.14.3 Incisions :

Aussitôt après la pose de la première couche, avant le séchage, on réalise des "incisions" à l'aide d'une brosse métallique ou de clous, ce qui permet d'améliorer l'adhésion de la seconde couche sur la première.

3.14.4 Seconde couche « la finition » :

Couche fine de scellement ou de protection qui confère au bâtiment son esthétique, celle-ci est réalisée quand la première couche est complètement sèche. Son épaisseur est de 1 à 2 mm.

Les proportions approximatives du mortier sont :

1 part de terre (qui passe le tamis de 2 mm) 3 ou 4 parts de sable fin. Au moment de réaliser cette couche, il est important de réaliser plusieurs échantillons en modifiant les proportions jusqu'à obtenir un mélange approprié qui ne se fissure pas et soit résistant.

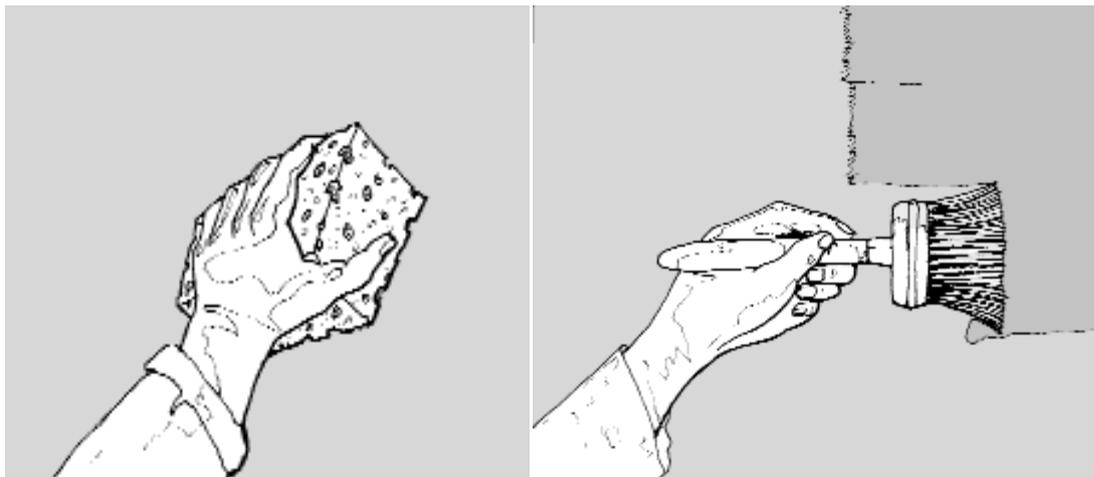


3.14.5 Tamponnement :

Réalisé avec une éponge en effectuant des déplacements circulaires, et en attendant quelques minutes (15 à 20 minutes) pour passer un pinceau sec en mouvement rectilignes, l'objectif étant de tamponner la surface.

Il existe d'autres solutions ou combinaisons.

Chaux et sable, /chaux, sable et terre/ plâtre et sable/ plâtre, chaux et sable.



3.15 Conclusion :

A travers cette étude nous découvrons que la BTC est un matériau de construction utilisé dans l'antiquité jusqu'à nos jours dans l'architecture moderne et n'a pas perdu de ses valeurs utilitaires, seulement elle à connu un développement de sa fabrication par l'industrie.

chapitre.4 Le confort et les principales pathologies des constructions en terre.

4.1 Le confort générer par l'utilisation la terre :

- Elle génère un climat intérieur sain et esthétique.
 - Le confort hygrothermique qui est l'un des atouts majeurs de la terre grâce à son inertie (la régulation de l'humidité de l'aire intérieur, elle stock lorsque celle-ci devient trop élevée, et la restitue lorsque l'aire devient sèche, elle respire).
 - Confort acoustique avéré.
 - L'odeur de la terre rappelle directement la nature qui nous entoure.
 - Un avantage qui est très attrayant c'est qu'elle diminue l'influence négative des ondes radio.
- L'utilisation de la terre augmente la sensation de confort tout au long de l'année et diminue drastiquement les factures énergétiques.



4.2 Les principales pathologies rencontrées sur le bâti en terre :

Sont les suivantes :

- l'érosion de la tête de murs.
- des sillons destructeurs horizontaux le long du mur.
- des remontées capillaires depuis la base du mur (figure 24).
- la présence de mousse et champignons sur les murs.
- des fissures verticales petites ou importantes.
- un éclatement, un décollement ou des fissures de l'enduit qui sert de revêtement.
- des parties de murs abîmées voir effondrées.
- l'écartement de deux pans de murs au niveau des angles. [35]



Figure 24 : les remontées capillaires.

4.3 Conclusion :

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que la brique de terre est utilisable vu ses significatives propriétés, de plus ce travail montre que la construction en terre a plusieurs avantages pour réaliser des différents édifices.

La terre crue absorbe et restitue l'humidité, régule la température par inertie thermique et est également un très bon isolant phonique. Ses avantages écologiques sont également conséquents. Comparativement la terre crue n'utilise que 3% de l'énergie utilisée dans une construction en béton.

Partie expérimentale

Introduction :

Après toutes les généralités et les informations sur la construction en terre en général et la construction en blocs de terre comprimée en particulier, il reste une étude pratique sur les blocs pour connaître mieux leurs performances, et atteindre notre objectif de revaloriser ce type constructif.

Parmi toutes les recherches, essais et expériences faites sur les blocs de terre comprimée on précise les recherches qui concernent le sol de M'Silla (Algérie).

Cette partie décrit l'ensemble des méthodes et techniques utilisées dans les essais ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre.

Comme nous ne sommes pas pouvoir faire les expériences pour ce travail, Nous avons étudié quelques expériences liées au sujet de notre recherche et les avons résumées, la première s'adresse à H.MEKAOUI. Et La deuxième à A.HAMDOUN afin de confirmer notre travail.

On commence la recherche par Caractérisation Mécanique de la Brique de Terre Comprimée et Stabilisée(BTCS) sous l'effet des efforts de Compression et de Flexion puis l'étude de l'influence des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques d'un BTC préparé à base de l'argile de Chaâba El Hamra (Wilaya de M'Silla).

chapitre.5 Caractérisation et méthodes expérimentaux.

5.1 Matériaux utilisés :

HAMDOUNE. A : L'Argile, le ciment, les déchets de brique, les fibres et l'eau.

a. L'argile rouge :

La terre étudiée est extraite à partir de « Chaâba l'Hamra » wilaya de M'silla (Algérie), il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

b. Le Ciment :

Le ciment utilisé est : CEMII/A-L classe 42,5 de Ain touta produit l'usine la wilaya de Batna.

c. Les Déchets de brique :

La brique utilisée dans cette étude est obtenue par broyage du déchet collecté de différents chantiers.

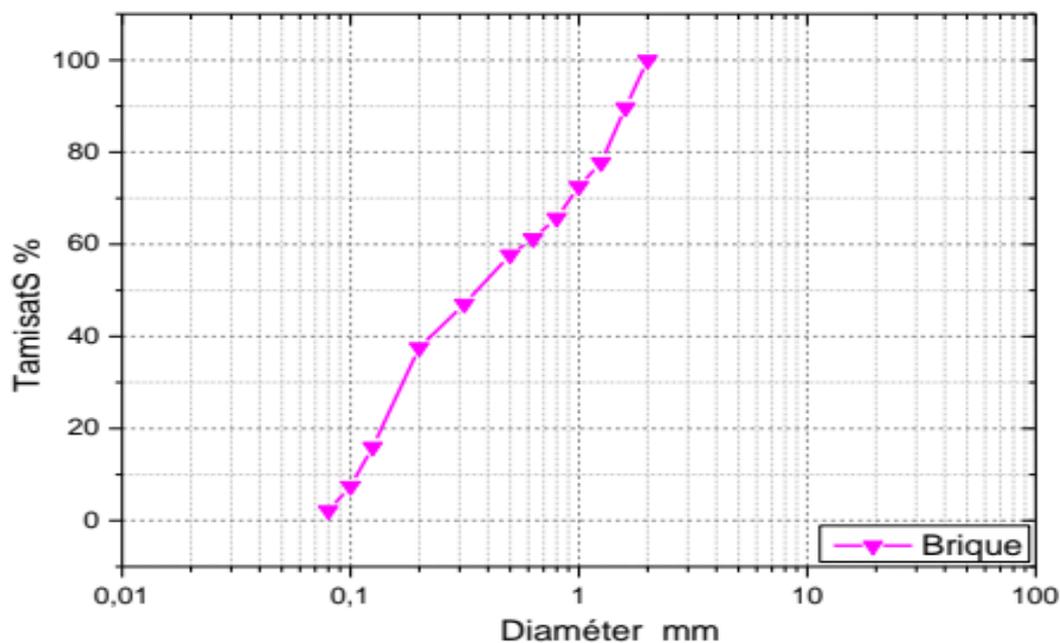


Figure 25: Courbe granulométrique de la brique broyée.

Masse volumique apparente /état lâche		Masse volumique apparente/état compact		Masse volumique absolue	
valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)	valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)	valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)
1,134	1,327	1,347	1,329	2,352	2,358
1,118		1,328		2,5	
1,121		1,334		2,22	

Tableau 4 : Les masses volumiques de la brique broyée.

d. Les fibres :

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres végétales (Filasse de sisal). Caractéristiques des fibres utilisées :

- Longueur : 5cm.
- Diamètre : 7- 47.
- Densité : 1,20(d/cm).



Figure 26 : Fibres de filasse utilisées.

MEKKAOUI.H : L'argile, le ciment, la chaux et l'eau de robinet.

e. L'argile :

La terre étudiée est extraite de différents sites de la région de la wilaya de M'silla (Algérie) : l'argile grise est extraite de la ville « Al-Rachna », l'argile verte est extraite de la ville

«Mâadid » et l'argile rouge est extraite à partir de « Chaâba l'Hamra », il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

Ils sont utilisés trois types d'argile, argile n°1 « argile rouge (Argile *rge*) », argile n°2 « argile verte (Argile *vrt*) », argile n°3 «argile grise (Argile *grs*) ».



Figure 27 : Argile n°1 Argile *rge*, Argile n°2 Argile *vrt* et Argile n°3 Argile *grs*.

f. Le ciment :

Le ciment utilisé est le ciment de la cimenterie Lafarge (wilaya de M'Silla) « MOKAOUEM » CRS et « MATINE » CPJ-CEM II 42.5 et le ciment CEMII/A-L classe 42,5 de Ain touta produit l'usine la wilaya de Batna (figure 28).



Figure 28 : Les deux types de ciment utilisé.

g. La chaux :

Dans cette étude il a utilisé la chaux broyée de la wilaya de Saida (Algérie).

h. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau potable de laboratoire de développement des Géo matériaux Université de M'Silla.

5.2 Caractérisation du sol étudié :

5.2.1 Analyse chimique :

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	Ca O	Mg O	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
%	34,62	9,16	3,44	22,52	4,66	0,94	0,63	1,1	0,14	22,98

Tableau 5: Analyse chimique de l'argile rouge.

5.2.2 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :

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

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

Tableau 6: Analyse granulométrique pour le type d'argile *rge.*

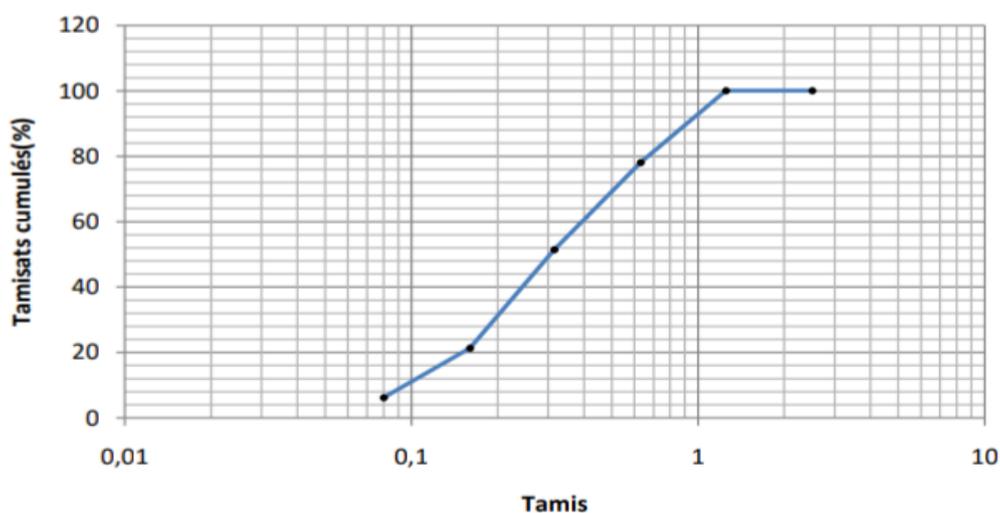


Figure 29 : Courbe granulométrique d'argile *rge.*

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

Tableau 7: Analyse granulométrique pour le type d'argile *vrt.*

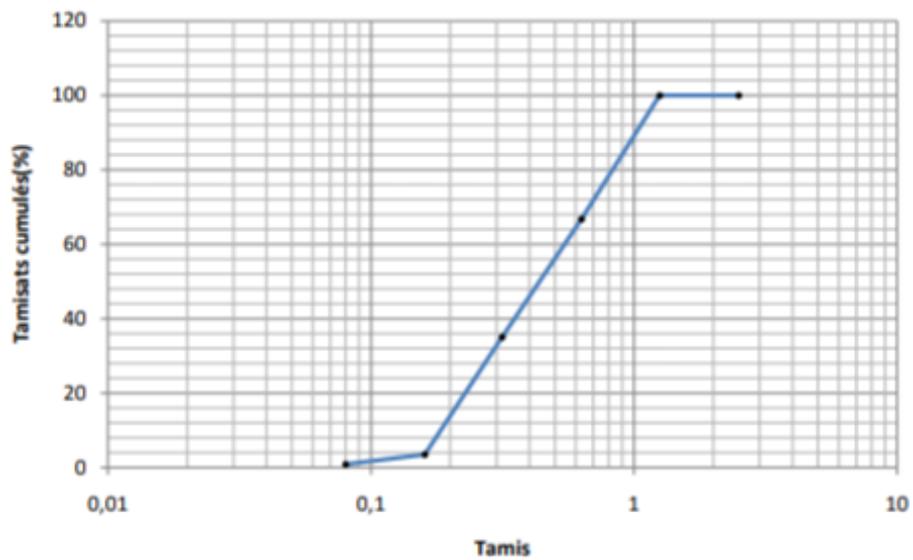


Figure 30 : Courbe granulométrique d'argile *vrt.*

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisât (%)
2.5	00	00	00	100
1.25	00	00	00	100
0.630	543.6	543.6	27.18	72.82
0.315	568.8	1112.4	55.62	44.38
0.160	465,3	1577,7	78,88	21,12
0.08	240,5	1817,5	90,87	9,13
fond	182,4	1999,9	99,99	0,01

Tableau 8 : Analyse granulométrique pour le type d'argile *grs.*

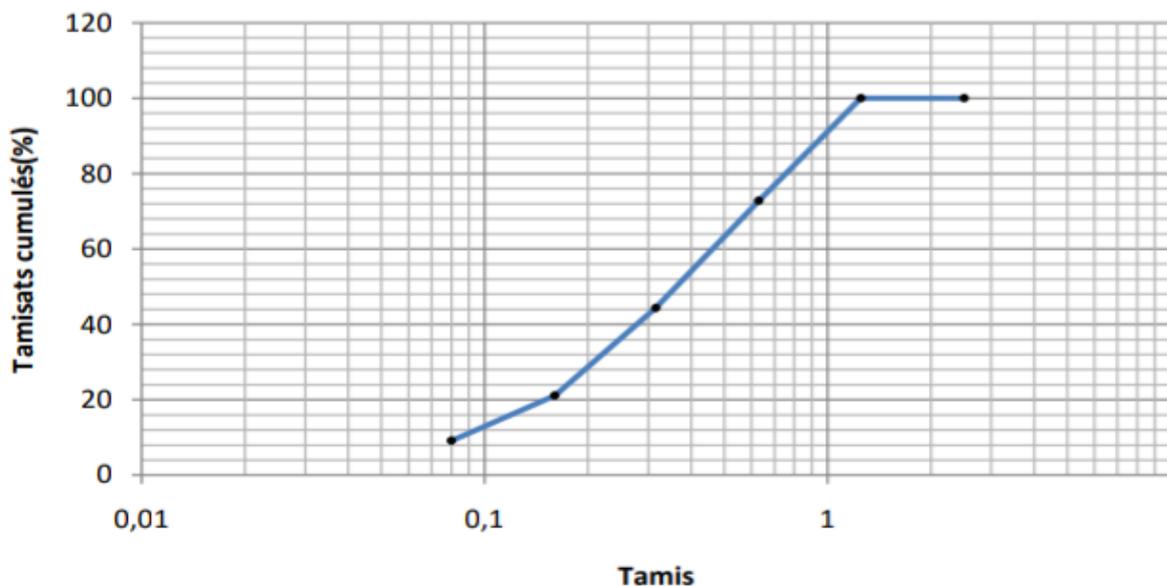


Figure 31 : Courbe granulométrique d'argile *grs.*

5.2.3 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057) :

La sédimentation à la fraction inférieure à 0.08 mm Les particules du sol sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données (Figure 32).

[36]



Figure 32 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Tamis (mm)	Refus %	Refus cumulés (g)	Passants %	Passants (g)
0,075	34,09	165,45	65,91	329,55
0,055	41,19	200,95	58,81	294,05
0,038	48,28	236,4	51,72	258,6
0,025	55,38	271,9	44,62	223,1
0,017	62,47	307,35	37,53	187,65
0,012	73,11	360,52	26,89	134,45
0,008	83,75	413,72	16,25	81,25
0,005	90,85	449,22	9,15	45,75
0,002	96,33	476,62	3,67	18,35

Tableau 9 : Analyse granulométrique par sédimentométrie.

5.2.4 Les limites d'Atterberg (NF P94-051) :

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_L).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_P).

Ces limites ont pour valeur de la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute.

La différence $I_p = W_L - W_P$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon.



Figure 33 : Appareillage d'essai.

(Source : PFE, HAMDOUNE, A.2019)

Les Types d'argiles	Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	L'indice de plasticité I_p (%)
Argile grise	50,52	33,56	16,96
Argile rouge	24,08	18,74	5,34
Argile verte	26,83	25,46	1,37

Tableau 10 : Les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 03 types des argiles.

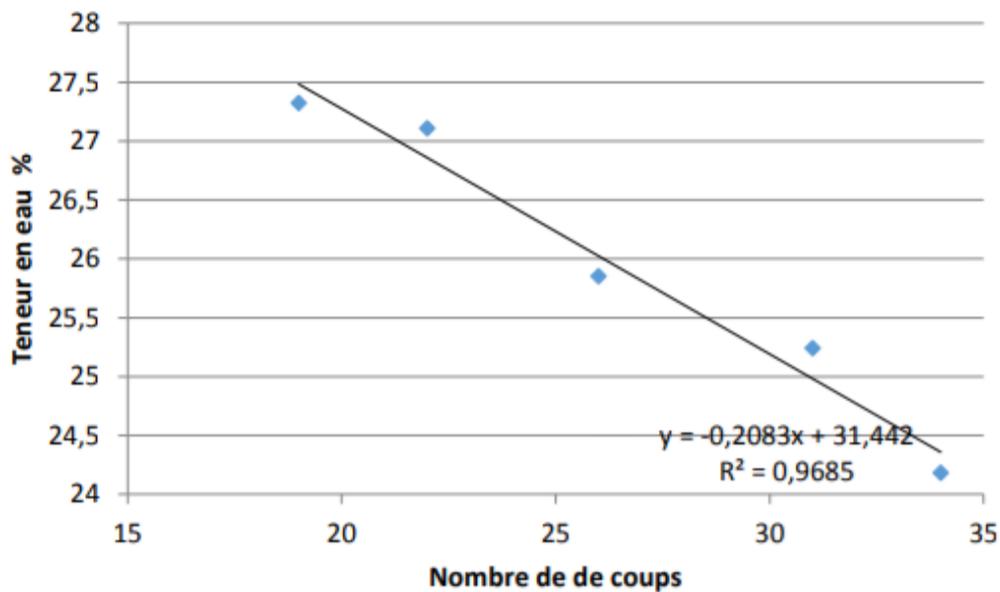


Figure 34 : Détermination de la limite de liquidité.

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

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

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

5.2.5 L'essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction < 0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation.

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse.



Figure 35 : Appareillage d'essai.

	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm ³)	VBS
Essai 1	80	125	1,68
Essai 2	80	115	1,56
Moyenne	80	120	1,62

Tableau 11 : Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

Avec : $VBS = (B/M_s) * C * 100$

B : masse de bleu introduite dans le bêcher (en g)

M_s : masse sèche de la prise d'essai (en g).

C : proportion de 0/5 mm soumis à l'essai dans la fraction 0/50 du matériau sec.

La valeur de bleu au méthylène VBS est égale à 1,62. D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux peu plastique.

5.3 Conclusion :

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

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

On remarque dans cette étude que l'argile grise est une argile très plastique, par contre les autres types d'argiles (rouge et verte) sont des argiles peu plastiques.

chapitre.6 Elaboration d'un modèle expérimental des BTCS.

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

6.1 Confection des blocs :

6.1.1 Etapes de préparation :

Selon MEKKAOUI :

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

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

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

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

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

Il pose l'argile sèche avec la quantité du ciment ou la chaux, dans le malaxeur (figure 35) et on malaxe le mélange à sec durant 40 à 60 secondes puis il ajoute une quantité d'eau, puis il malaxe pendant 120 à 180 seconde jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

5- Le moulage des éprouvettes : cette opération est exécutée à l'aide d'une presse manuelle (sous pression estimée à 300 KN)

6- Compactage des mélanges : Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse manuelle : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble – moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. Durant toute cette étude il a appliqué une seule contrainte de compactage (75 MPa).

7- le démoulage des éprouvettes : exécuté à l'aide d'un extracteur mécanique (figure 35).

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques des dimensions (7*7.5) cm³.



Figure 36 : Le malaxeur et l'extracteur mécanique utilisé.

6.1.2 Préparation des mélanges :

1- **Tamissage et étuvage** : le sol a été tamisé à l'aide d'un tamis de 0.8mm de maille puis séché à l'étuve à 55°C.

2- **On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux** : argile, ciment, déchet de brique Fibre et eau.

3- **Préparation des moules** : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les moules sont prêts pour utilisation.

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

On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment et fibre et également déchet de brique, on malaxe le mélange à sec durant 60 à 120 secondes

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

Le malaxage et la préparation des moules sont des opérations importantes dans la Fabrication de la BTC.

Le moulage des éprouvettes : cette opération est exécutée à l'aide d'une presse hydraulique.

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques des dimensions (10*20) cm³.



Figure 37 : Le Présurasse De Fabrication De BTC.

Les études de **MEKKAOUL.H** sont fait à l'aide d'un logiciel « Minitab », on a choisi les facteurs présenté dan les tableaux ci-dessous.

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

Tableau 12 : Les facteurs choisis.

6.2 La cure des éprouvettes :

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



Figure 38: Conservation des blocs au laboratoire et l'étuve utilisée pour la cure.

A. Choix de la méthode d'expérimentation :

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

B. Logiciel utilisé :

- **Présentation de logiciel « Minitab » :**

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

Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

- **Diagramme de Pareto :**

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

- **Graphique des effets :**

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

- **Graphique des interactions :**

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

6.2.1 Essai de compression simple (la norme P 18-406) :

L'essai de compression est réalisé suivant la norme P18-406

La résistance à la compression est réalisée suivant est donnée par la formule suivante :

$$R_c = F/S.$$

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

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

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm^2 .



Figure 39 : Presse hydraulique pour l'essai de compression et Le bloc après écrasement.

6.2.2 Essai de traction par fendage :

Cet essai est dérivé de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Il s'agit de soumettre le bloc après une cure à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit en une contrainte moyenne de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes.



Figure 40 : l'essai de traction par fendage.

La résistance à la traction par fendage des blocs est donnée par la formule suivante :

$$Où : R_t = 0.9 \times 10 \times 2F / \pi l h$$

R_t : Résistance à la traction des blocs en Méga Pascal (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi- blocs en KN ; **l** : Largeur du bloc en centimètres (cm) ; **h** : Epaisseur du bloc en centimètres (cm).

6.2.3 Essai de flexion :

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

- **Principe :**

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

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

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



Figure 41 : L'essai de flexion d'après « CNERIB ».



Figure 42 : Briques de terre comprimées et stabilisées.

chapitre.7 Les résultats.

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

Résultats des essais [37] :

7.1 Les masses volumiques et les résistances :

Masse volumique apparente /état lâche		Masse volumique apparente/état compact		Masse volumique absolue	
valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)	valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)	valeur (g/cm ³)	Moyen (g/cm ³)
1,195	1,207	1,347	1,371	2,5	2,5
1,218		1,368		2,35	
1,208		1,399		2,66	

Tableau 13 : Les masses volumiques du sol.

7.1.1 L'effet des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.

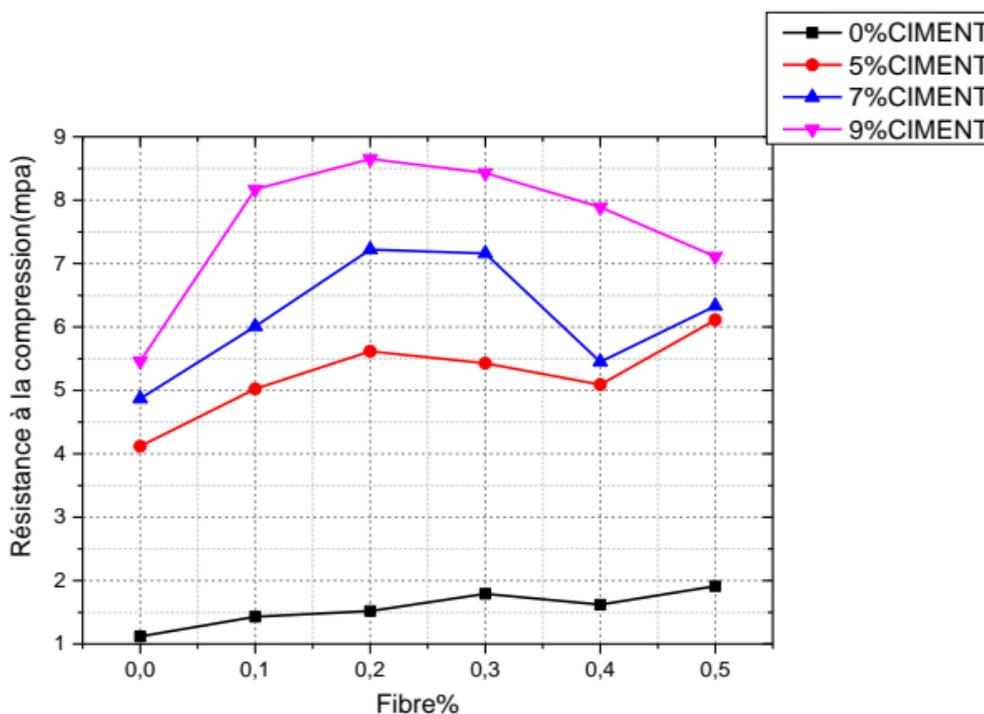


Figure 43: Graphe de l'effet des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.

7.1.2 L'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression à 28j sur BTC :

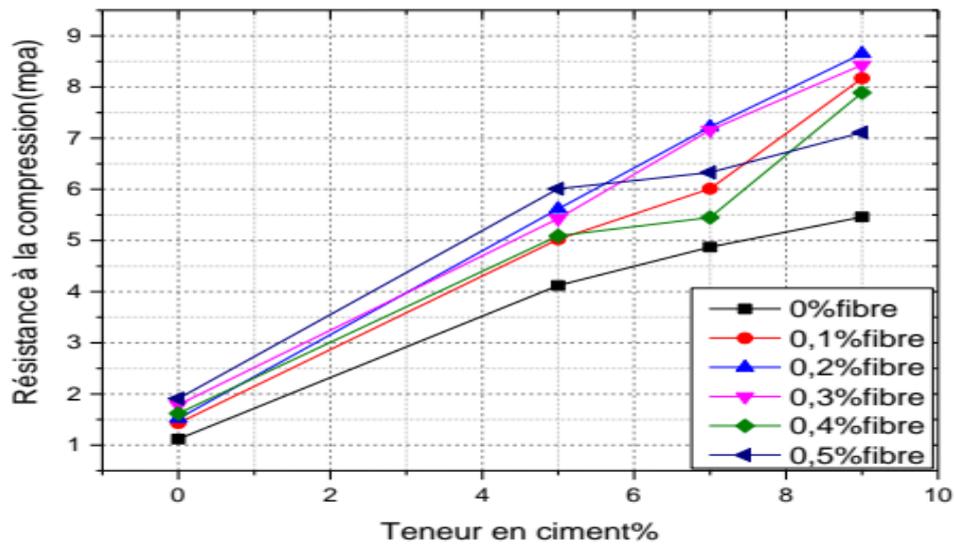


Figure 44 : Graphe de l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression à 28 jours sur BTC.

7.1.3 L'effet des fibres sisal sur la résistance à la traction R_t à 28j de BTC :

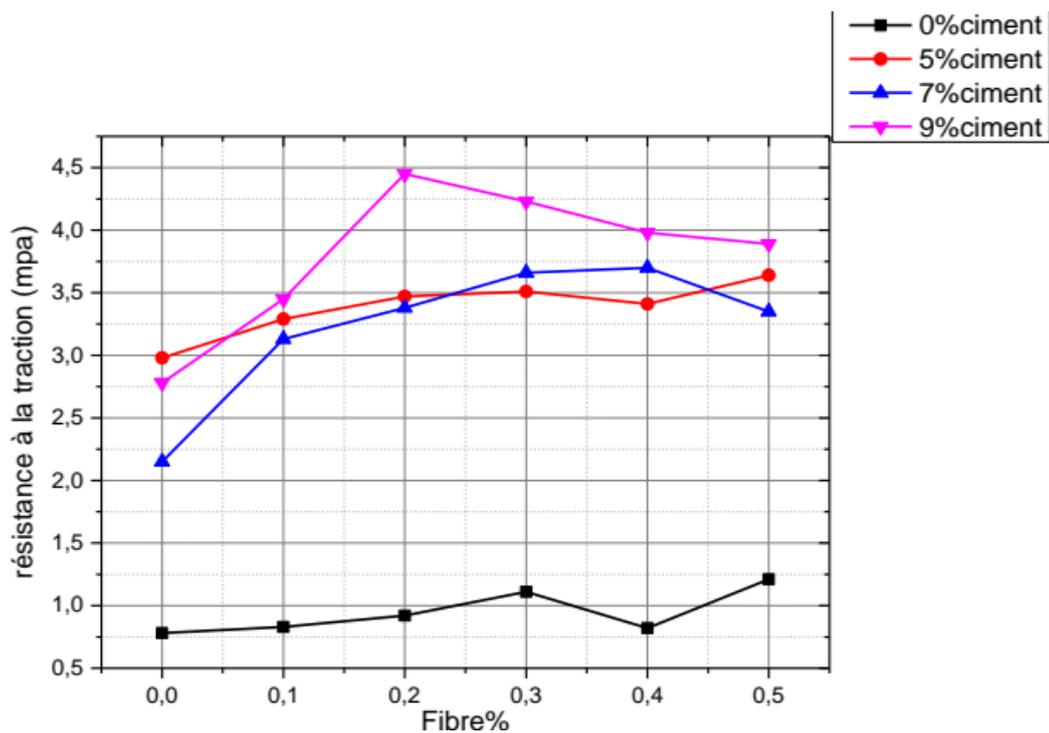


Figure 45: Graphe de l'effet de la teneur en fibre sur la résistance à la Traction par Fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment.

7.1.4 L'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment :

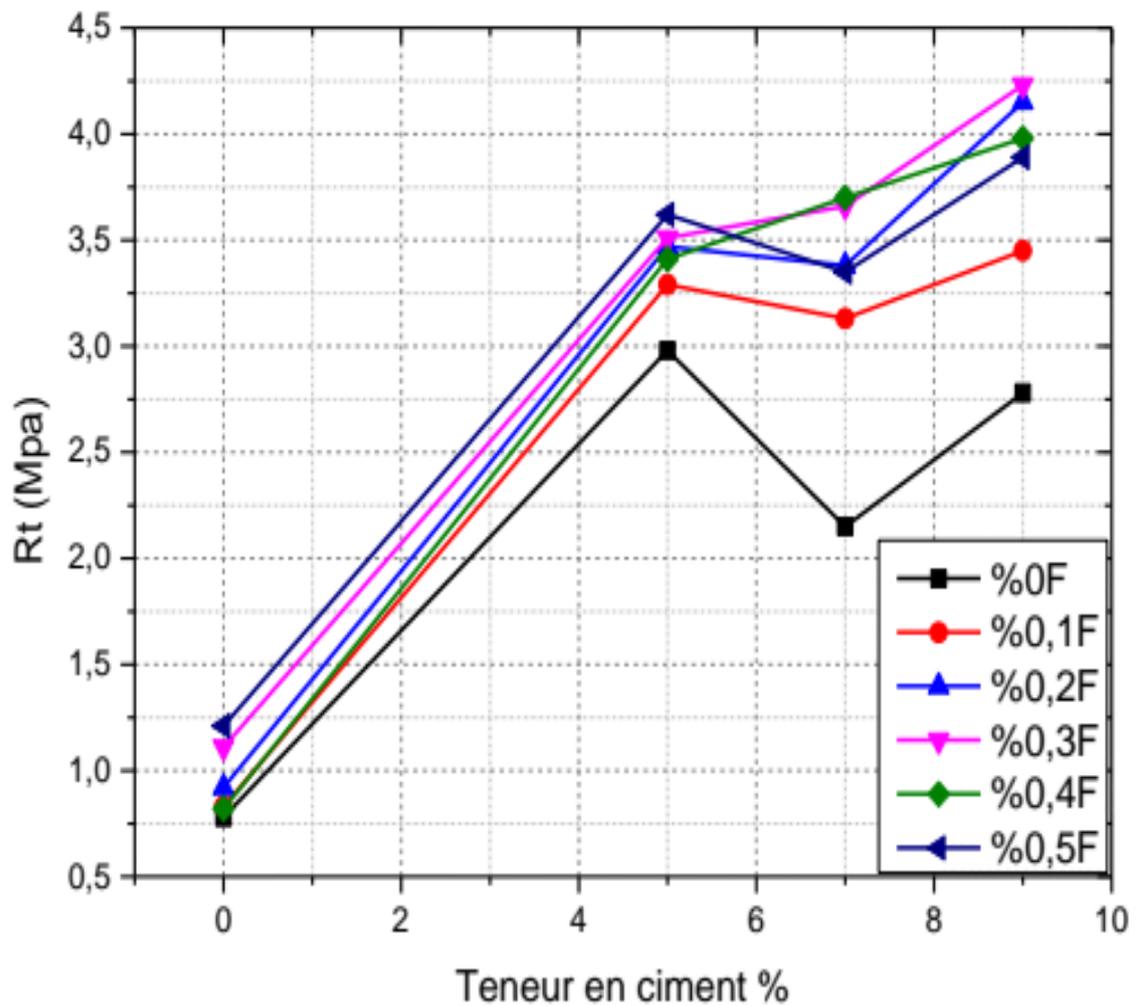


Figure 46 : Graph de l'effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment.

Résultats des essais [38] :

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2(%) d'eau	Facteur 3 Type de stabilisant	Facteur 4 (%) de stabilisant	La masse volumique kg·m ⁻³	La résistance mécanique à 7j(MPa)	La résistance mécanique à 28j (MPa)
1	75ARGgrs/ 25ARGrge	5	CRS	10	2419	14,34	18,61
2	75ARGgrs/ 25ARGrge	10	CRS	10	2316	7,36	13,74
3	50ARGgrs/ 50ARGrge	5	CRS	10	2410	17,71	20,69
4	50ARGgrs/ 50ARGrge	10	CRS	10	2349	8,95	14,29
5	75ARGgrs/ 25ARGrge	5	CRS	6	2418	12,41	13,64
6	75ARGgrs/ 25ARGrge	8	CRS	6	2356	7,35	9,89
7	50ARGgrs/ 50ARGrge	5	CRS	6	2412	12	15,53
8	50ARGgrs/ 50ARGrge	8	CRS	6	2414	12,06	15,86
9	75ARGgrs/ 25ARGrge	5	Matine	10	2421	18,97	21,92
10	75ARGgrs/ 25ARGrge	8	Matine	10	2369	12,82	15,08
11	50ARGgrs/ 50ARGrge	5	Matine	10	2420	16,91	21,14
12	50ARGgrs/ 50ARGrge	8	Matine	10	2380	12,08	18,14
13	75ARGgrs /25ARGrge	5	Matine	6	2424	13,01	15,39
14	75ARGgrs /25ARGrge	8	Matine	6	2365	9,67	10,91
15	50ARGgrs /50ARGrge	5	Matine	6	2422	13,76	(écrasé à 7jours)
16	50ARGgrs /50ARGrge	8	Matine	6	2386	10,22	13,61
17	75ARGgrs /25ARGrge	5	Chaux	10	2332	11,44	10,96

Tableau 14 : Les résultats des masses volumiques, les résistances mécaniques à 7 j et à 28 j des BTC.

N° essai	Facteur1 Type de mélange	Facteur 2(% d'eau	Facteur 3Type de stabilisant	Facteur 4(% de stabilisant	La masse volumique kg·m ⁻³	La résistance mécanique à 7j(MPa)	La résistance mécanique à28j (MPa)
18	75ARGgrs /25ARGrge	10	Chaux	10	2295	8,12	(écrasé à 7jours)
19	50ARGgrs /50ARGrge	10	Chaux	10	2296	7,61	10,18
20	75ARGgrs /25ARGrge	10	Chaux	6	2287	(écrasé à 28j)	8,40
21	50ARGgrs /50ARGrge	10	Chaux	6	2293	5,99	10,32
22	75ARGvrt/ 25ARGrge	5	CRS	10	2418	(écrasé à 28j)	15,06
23	75ARGvrt/ 25ARGrge	10	CRS	10	2327	(écrasé à 28j)	13,71
24	50ARGvrt/ 50ARGrge	5	CRS	10	2387	(écrasé à 28j)	16,39

Tableau 15 : Les résultats des masses volumiques, les résistances mécaniques à 7 j et à 28 j des BTC.

7.2 Les diagrammes et les graphes donnés par logiciel Minitab :

7.2.1 Diagramme de Pareto des effets pour la masse volumique et la résistance à 7 et 28 jours :

7.2.1.1 Diagramme de Pareto des effets pour la masse volumique :

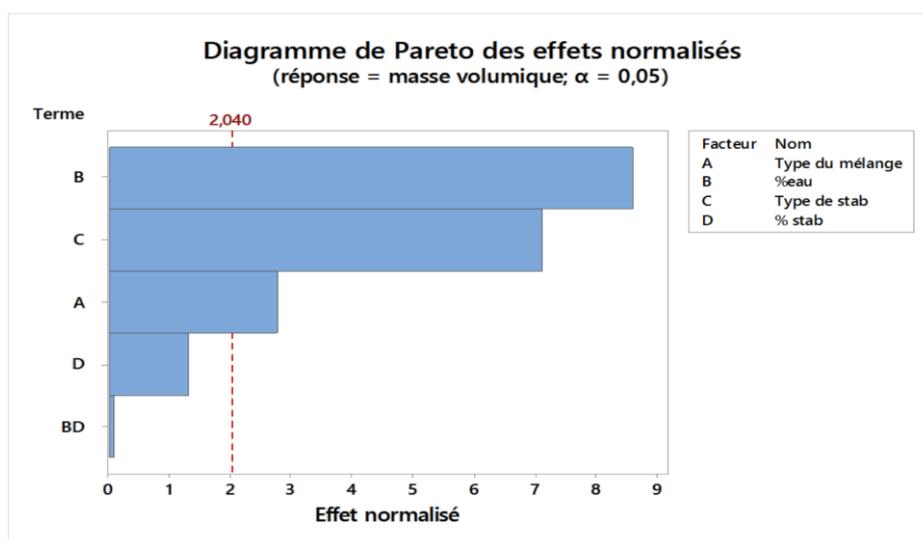


Figure 47 : Diagramme des effets pour la masse volumique.

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

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

7.2.1.2 Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 7 jours et 28 jours :

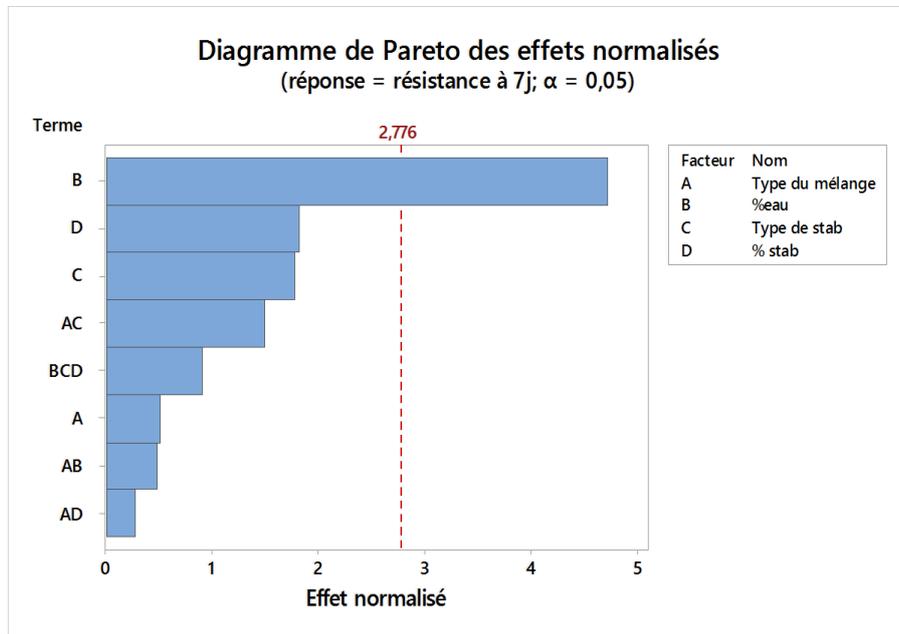


Figure 48: Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 7 jours.

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

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

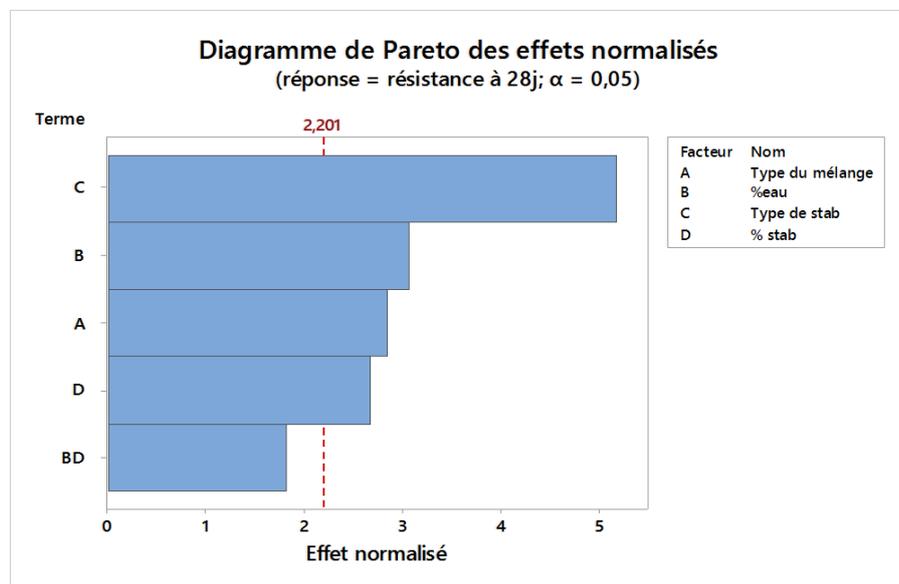


Figure 49: Diagramme de Pareto des effets pour la résistance à 28 jours.

Tous les facteurs ont un impact sur la résistance à la compression après 28 jours.

Par conséquent le facteur type de stabilisant est le plus important et principal(5,16).

7.2.2 Les effets principaux pour la masse volumique et la résistance à 7 et 28 jours :

7.2.2.1 Les effets principaux pour la masse volumique :

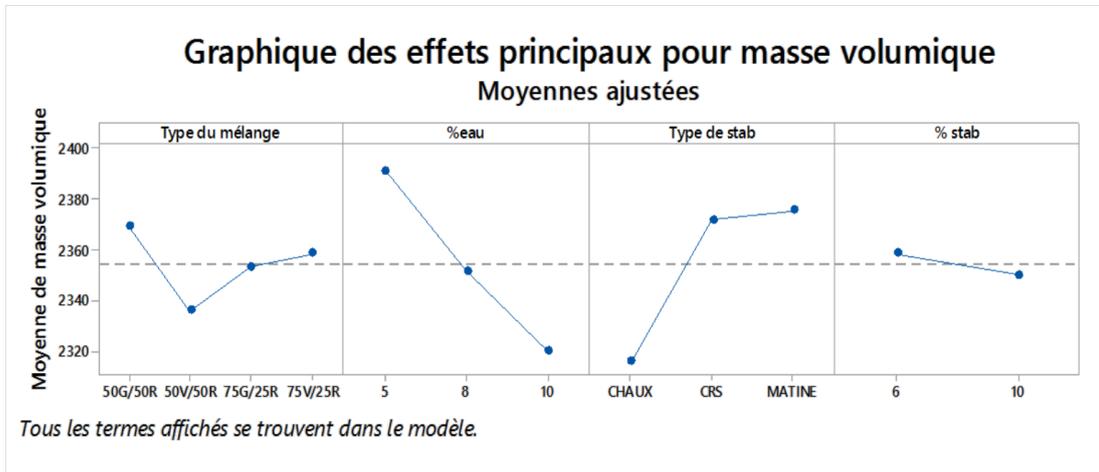


Figure 50: Graphique des effets principaux pour la masse volumique.

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

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

7.2.2.2 Les effets principaux pour la résistance à 7 jours :

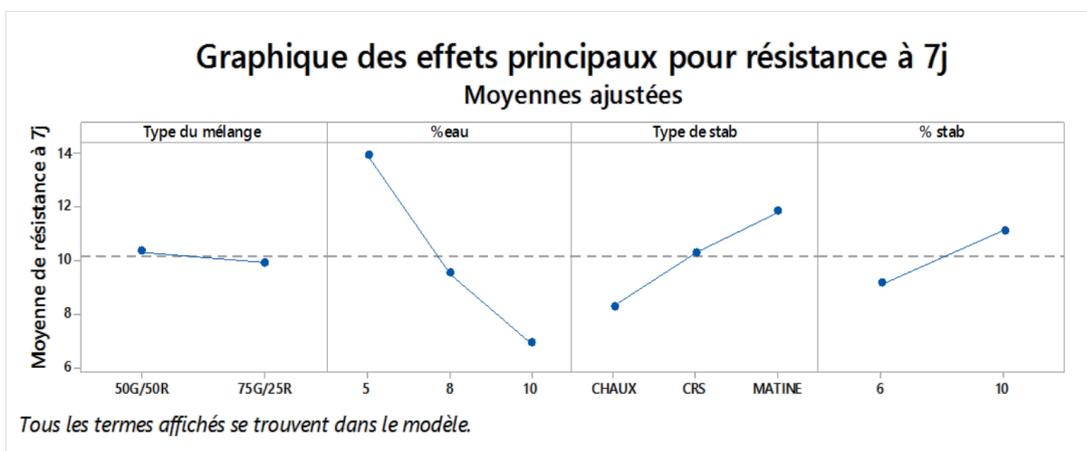


Figure 51 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 7 jours.

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

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

7.2.2.3 Les effets principaux pour la résistance à 28 jours :

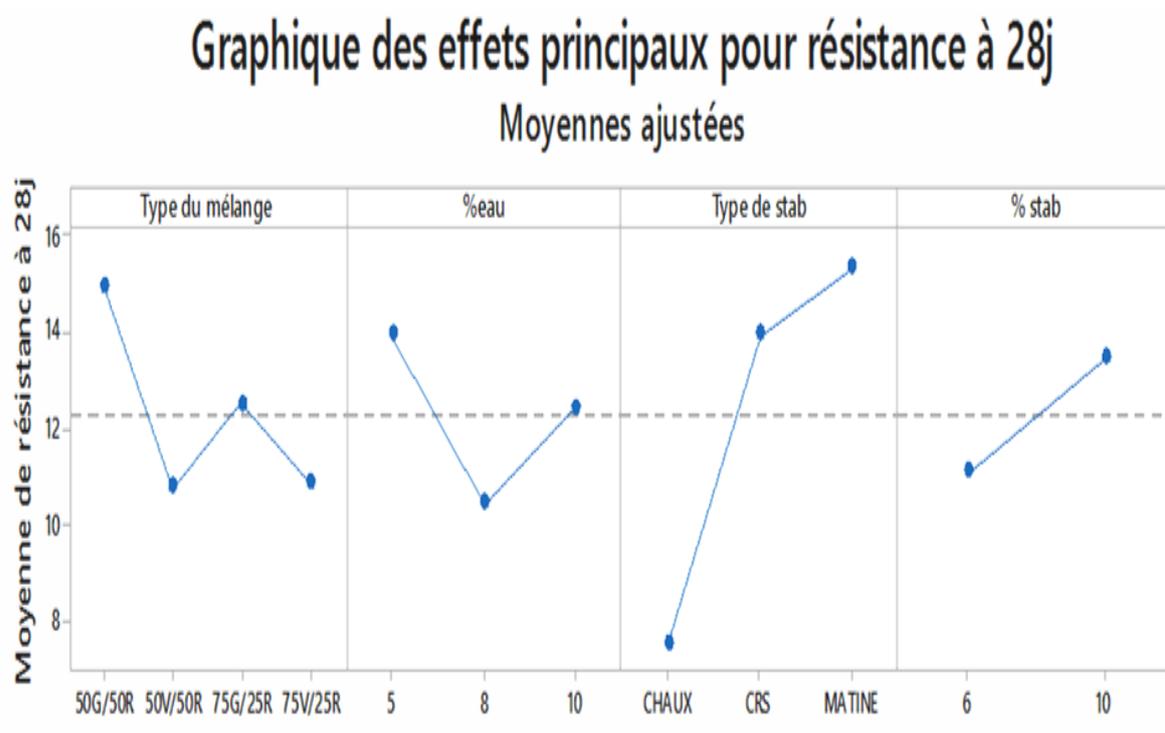


Figure 52 : Graphique des effets principaux pour la résistance à 28 jours.

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

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

Tous les types de mélanges sont considérés acceptables.

- la résistance augmente à 28 jours quand le pourcentage d'eau varie entre (5%) et (10 %).
- les meilleures valeurs de résistance sont dues des types de stabilisants MATINE et CRS.
- la résistance augmente quand le (%) de stabilisant est de pourcentage supérieur à (6%).

7.3 Interactions des facteurs :

7.3.1 Les interactions entre les constituants pour la masse volumique :

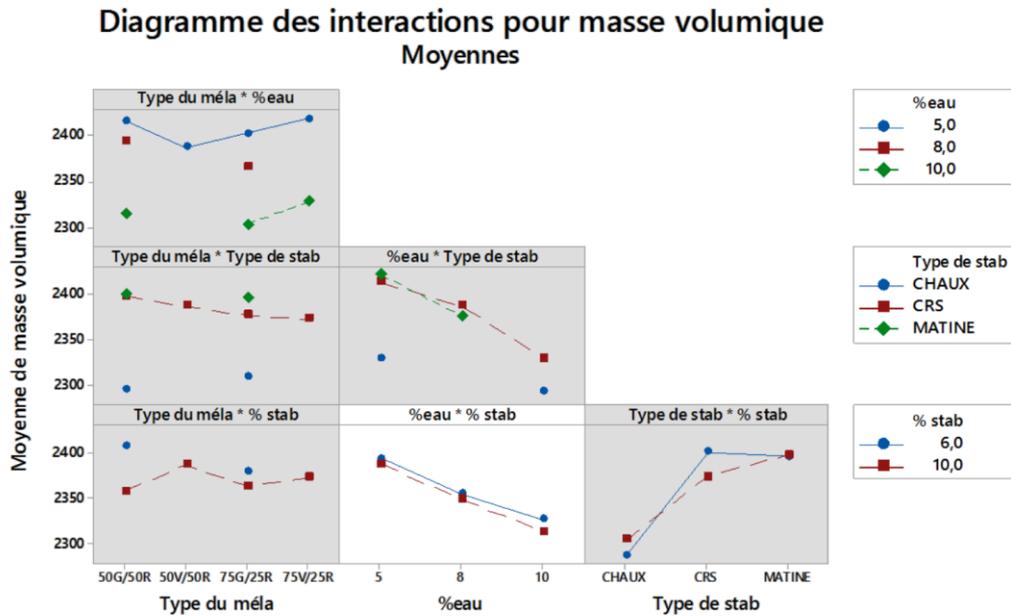


Figure 53: Diagramme des interactions entre les constituants pour la masse volumique.

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

Donc On peut obtenir la meilleure valeur de masse volumique lorsqu'on utilise le stabilisant « Matine » ou « CRS » avec (5%) d'eau et n'importe quel pourcentage de stabilisant

Tous les mélanges sont bons.

7.3.2 Les interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours :

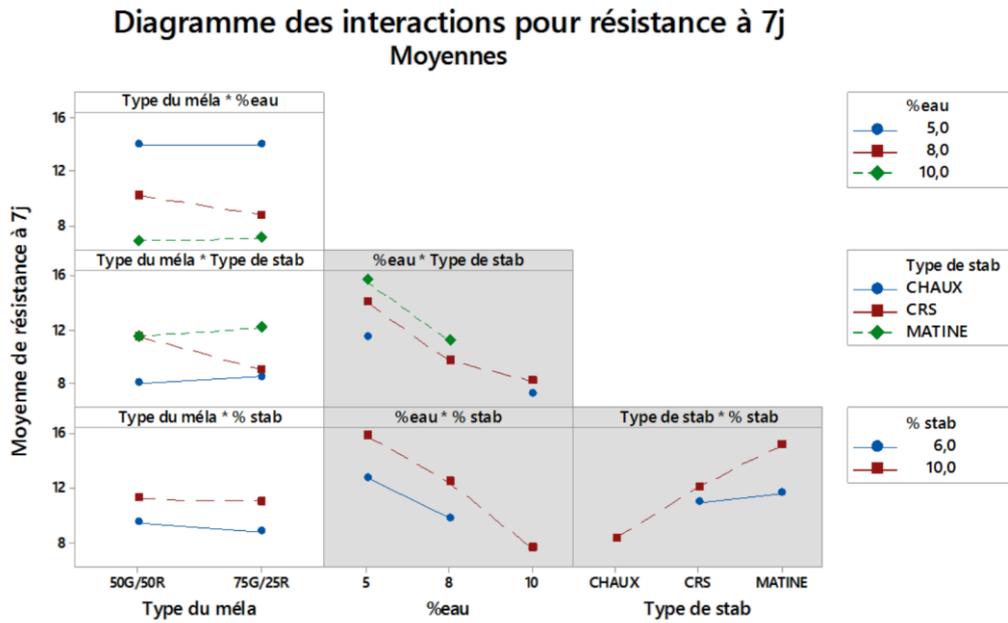


Figure 54 : Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 7 jours.

-Lorsque la quantité d'eau augmente la résistance à 7 jours est diminuée.

La meilleure valeur de résistance à 7 jours (16 MPa) est obtenue avec (5%) d'eau et avec le stabilisant « Matine ».

-le mélange (50G/50R) est le parfait parmi tous les mélanges réalisés.

-La chaux donne un mauvais résultat.

7.3.3 Les interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours :

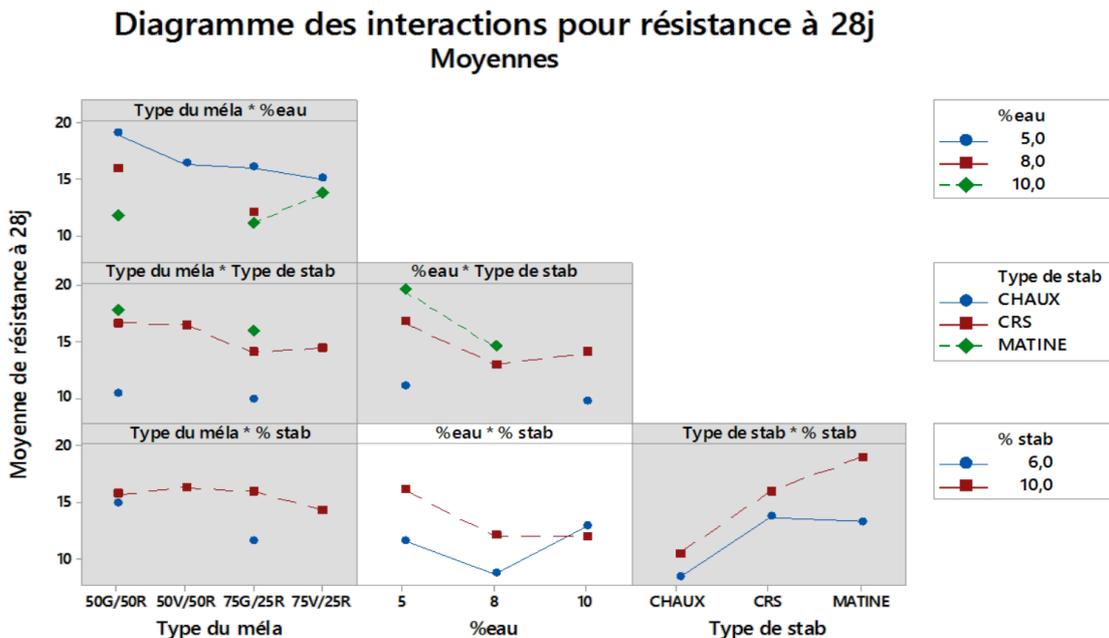


Figure 55: Diagramme des interactions entre les constituants pour la résistance à 28 jours.

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

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

- Le mélange optimal tel que la résistance supérieure à 15 MPa est obtenue avec les stabilisants « Matine » ou « CRS ».

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

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

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

7.3.4 Conclusion :

Les résultats obtenus ont montré que la stabilisation au ciment donne les meilleurs résultats en résistance par rapport à la chaux.

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

- La nature de stabilisant et sa quantité

- La qualité de la terre

- La qualité du compactage

- Du teneur en eau

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

Les résultats obtenus ont montré que :

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

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

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

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

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

7.4 Résultats globaux :

7.4.1 La résistance à la compression :

Les BTC à base de ciment, l'effet de la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression du BTC est présenté dans la figure 43. À travers ces résultats de BTC sans traitement (0% ciment) on observe une augmentation de la résistance avec l'augmentation des fibres. Les éprouvettes contenant les fibres résistent mieux à la compression que les éprouvettes de sol naturel.

Pour les autres cas 5 et 7 et aussi 9% de teneur en ciment, on remarque que l'ajout des fibres a conduit à une augmentation de la résistance jusqu'à 0.2 % en fibres.

Pour les blocs renforcés avec un dosage en fibres supérieur à 0,2%, il y a une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres. La diminution de la résistance à la compression du BTC peut être attribuée à la domination de l'effet des fibres sur celui de la teneur en ciment. Ceci peut être expliqué par le fait que la quantité de produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés par les fibres. Ces vides sont dus au caractère élastique des fibres durant le compactage. Une fois la contrainte de compactage enlevée, le matériau relâche et le volume occupé par les fibres augmente créant ainsi une porosité supplémentaire et conséquemment affecte négativement la résistance.

A titre d'exemple, la résistance à la compression des mélanges non renforcés en fibres augmente de 267%, 334.82% et 388% MPa quand les blocs sont stabilisés par 5, 7 et 9%, respectivement. Ces pourcentages sont calculés par rapport au mélanger de référence (sol naturel).

7.4.2 La résistance à la traction :

L'effet de la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la traction (figure 45), les résultats montrent que la résistance à la traction augmenté avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à certain taux des fibres. Pour ce cas, l'augmentation de la résistance à la traction pour une teneur en ciment respectivement de 5%,7% et 9 %. Conformément aux résultats obtenus pour la résistance à la compression. On observe que l'augmentation de la teneur en ciment a causé une augmentation de la résistance à la traction.

A titre d'exemple, la résistance à la traction des mélanges renforcés par 0.3% en fibres augmente de 216.22%, 230% et 281%MPa quand les blocs sont stabilisés par 5, 7 et 9%, respectivement. Ces pourcentages sont calculés par rapport au mélanger de référence (sol naturel avec 0.3 % fibres).

7.5 Conclusion :

Dans le présent travail, les propriétés physico-mécaniques d'un BTC produit à base d'une argile collectée de la ville de M'silla (Chaâba El Hamra), ont été déterminées. L'étude expérimentale réalisée s'articule sur l'incorporation des déchets de brique dans le but de produire un matériau respectant l'environnement (matériau vert) et l'emploi des fibres naturelles comme renforts dans le sol et l'utilisation du ciment comme agent stabilisant.

- ✓ Les fibres ont été ajoutées en différents pourcentages : 0 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 et 0,5% par rapport à la masse totale du BTC, tandis que le ciment a été employé en trois pourcentages ; 5, 7 et
- ✓ 9%. Les résultats obtenus montrent que l'ajout du ciment et des fibres aux blocs du BTC affecte ses propriétés mécaniques finales. En effet, l'utilisation des fibres et du ciment rend l'argile de Chaâba utilisable pour produire un BTC.
- ✓ Les blocs produits à base du sol seul et ceux renforcés en fibres de sisal (non traité au ciment) présentent une faible résistance à la traction. La résistance à la traction augmente avec l'augmentation du dosage en fibres.

Conclusion générale et recommandations :

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

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

-Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique de la brique de terre comprimée est une technique ancienne, plus communément dénommée brique de terre comprimée (BTC), qui a une évolution moderne et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

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

Pour atteindre notre but, **l'étude est scindée en deux parties :**

-La première partie est réservée à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé les différentes techniques de la construction en mettant en avant les avantages et inconvénients de chaque méthode et on précise la brique de terre comprimée comme matériau de construction principale.

-La deuxième partie est expérimentale, dans cette partie on base sur les essais et les contrôles qui confirment notre étude extraite à des recherches d'A.HAMDOUNE, et H.MEKAOUI, sur la Contribution à la production des blocs de terre comprimée en vue de les utiliser dans le bâtiment.

-Le ciment est un matériau de construction qu'on ne peut pas complètement abandonner dans un proche avenir car il s'agit d'un matériau de base pour la construction de nos bâtiments, mais nous pouvons progressivement réduire ses utilisations. Nous suggérons de créer une usine spécialisée dans la fourniture des matériaux de construction abordables et écologiques qui respectent les besoins et les conditions nécessaires à la construction.

Par exemple, nous pouvons remplacer le revêtement des murs en ciment par un revêtement d'argile pour profiter de ses avantages comme il est un excellent isolant thermique naturel et disponible partout dans notre environnement.

Référence :

- [1] **Romain Anger**, Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction, 2011.
- [2] **Sébastien Moriset**, Assistance à l'identification et à la préparation d'inscriptions au Patrimoine mondial : retours d'expériences en Afrique, France, 2018.
- [3] **CRATerre** (Centre International de la Construction en Terre) Laboratoire année de création 1979.
- [4] **Romain Anger**, Laetitia fontaine, bâtie en terre, du grain du sable à l'architecture, 2009.
- [5] **Construct.terre** (In Mango-Itulamy, L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège.).P01.
- [6] **Guillaud & Houben**, traité de construction en terre (2eme édition), Marseille, édition parenthèse, 1995.
- [7] **Rigassi Vincent**, Blocs de terre comprime Vol 1 Manuel de Production. CRATerre EAG, France (1995).
- [8] **HOUBEN Hugo**, GUILLAUD Hubert, Traité de construction en terre, Marseille, Ed. Parenthèses, 1989.
- [9] **GATE, 1994**, Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks). Eschbom, GTZ.
- [10] **IZEMMOUREN Ouarda**, Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, 2016.
- [11] **Zerrouki Ishak**, mémoire de master 2019(Effet de déchet de brique rouge sur la stabilisation des briques de terre crue), wilaya de Biskra, P09.
- [12] **Hubert Guillaud**, traité de construction en terre, 2006.
- [13] **TAALLAH Bachir**, thèse de doctorat en science (Etude du Comportement Physico-mécanique de bloc de terre comprimée avec fibres.), Biskra 2014, p20.
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_crue.
- [15] **RHONE A**, « Le pisé » www.ageden.org, Edition Décembre2010.
- [16] <https://www.ecohabitation.com/guides/2413/terre-crue/>
- [17] **RICHARD P**, «Adobe », mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
- [18] **LIVERT S**, «Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février2011.
- [19] **Akterre**, centre de formation et producteur de matériaux de construction et de finition en terre crue : akterre.com.
- [20] <http://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue-de/>
- [21] **Véronique Galmiche**, Construction et réhabilitation en terre crue. P37.

- [22] **BERREHAIL Tahar**, diplôme de magister La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable, Constantine 2009. P191.
- [23] **Adam Weismann, Katy Bryce**, « Construire en terre facilement, la technique du cob », France, Edition la plage, 2010, P17.
- [24] **As terre**, association national des professionnels de la terre crue, « La technique de la terre Coulée », site web : <http://www.asterre.org/construire-en-terre/la-terre-coulée>.
- [25] **Archilibre**, L'auto-construction de bâtiments, réalisations, matériaux, techniques ; « La terre Paille », Site web : <http://www.archilibre.org/materiaux/terpail/terrepaille1.html>.
- [26] **Lamouri Hafsa**, étude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoune, mémoire de master Adrar octobre 2014. P119.
- [27] **CRA Terre EAG** « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production.
- [28] https://www.oskam-vf.com/blocs_%20de_terre_comprimee.html.
- [29] <https://www.apte-asso.org/a-voir-ou-telecharger/eco-construction/les-murs/briques-de-terre-comprimees>.
- [30] **RICHARD-Philippe Wafer** « l'adobe, une solution durable pour la construction d'habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme la Chili », obtention de grade de maître en environnement présenté, octobre 2010 et [www.bing.com/Blocs, de?=terre.=comprimée](http://www.bing.com/Blocs,de?=terre.=comprimée), Manuel de conception et de production. Volume II, PDF/ 2017.
- [31] <https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue-de/>.
- [32] **Le village**, Bâtir un mur en briques de terre compressée, 2010, P14 et 15.
- [33] **LIVERT S**, « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011.
- [34] Adobe, guide de construction parasismique - Wilfredo Carazas Aedo, MISEREOR Ed. CRATerre. P30.
- [35] **Anaïs Chesneau - Guide** « L'architecture de terre en Midi-Pyrénées, pistes pour sa revalorisation » - Éco-centre Pierre et Terre.
- [36] **Mehdi Ch.** Étude de l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés géotechniques d'une argile stabilisée, mémoire de master 2019. P24.
- [37] **HAMDOUNE.A.** Contribution à la production des blocs de terre comprimée et renforcée par des fibres, mémoire de master M'silla 2019. P69.
- [38] **MAKKAOUL.H.** Caractérisation Mécanique de la Brique de Terre Comprimée et Stabilisée(BTCS) sous l'effet des efforts de Compression et de Flexion, mémoire de master M'silla 2019. P112.