



INFLUENCE DES FIBRES POLYMERIQUES SUR LES PERFORMANCES DES BLOCS EN TERRES COMPRIMEES

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 12 Janvier 2019 par

Mi-el Moriah Andy Comlan AZIABLE
(20150113)

Directeur de mémoire : Dr Adamah MESSAN (Maître de Conférence)

Co-Encadreur : Dr Abdou LAWANE (Assistant Maître de Conférence)

Encadrant 2iE : Mr. Philbert NSHIMIYIMANA (Doctorant 2iE)

LABORATOIRE ECO MATERIAUX ET HABITAT DURABLE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Professeur Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : M. Arnaud OUEDRAOGO (Doctorant)

M. Christian RAMADJI (Doctorant)

Promotion [2017/2018]

DEDICACE

Pour leur exprimer toute ma gratitude. Je dédie cet humble travail à :

- ✚ A mon Dieu Tout – Puissant, sans sa grâce cette présente étude n’aurait pu arriver à terme

- ✚ Mes parents pour les efforts consentis, et leur soutien moral et financier tout le long de mes études ;

- ✚ Mes frères et sœurs pour leur soutien moral, tous ceux qui m’ont assisté durant ma formation.

REMERCIEMENTS

Il est incontestable que ce manuscrit n'aurait pu voir le jour sans le soutien et l'accompagnement de nombreuses personnes, qui malgré leurs multiples occupations, n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter leur appui

Qu'il me soit permis de remercier particulièrement

- La Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers son personnel, pour leur engagement dans la réussite de notre formation.
- Mon directeur de mémoire, le responsable du LEMHaD, Professeur Adamah MESSAN. Je souhaite lui exprimer ma profonde gratitude. Merci de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et de m'avoir encadré tout au long de ce stage. Merci pour tout ce que vous m'avez appris durant ces mois, tant professionnellement qu'humainement.
- Mon encadreur Mr Philbert NSHIMIYIMANA qui m'a suivi tout au long de ce stage, Merci pour les nombreux conseils, votre accueil chaleureux et votre disponibilité. Tout le personnel du LEMHaD qui a participé au bon déroulement de ce stage en vue de la rédaction de mon mémoire de fins d'études.

Un grand merci à Mr Salifou KABORE,

- L'ensemble du corps enseignant du 2iE pour les connaissances transmises au cours de la formation du cycle de master
- Je remercie chaleureusement mes compagnons de laboratoire, Franck Aimé YAO, Eric AZOUMAH, Tarmangue DIME, Moïse et Hassane SEINI MOUSSA ;
- Je remercie mon grand-frère Freud et sa femme Julie qui m'ont accueilli et m'ont soutenu aussi bien moralement que financièrement tout au long de mon séjour à Ouagadougou
- Ma famille pour son soutien autant moral que financier
- Mes camarades de promotion

RESUME

Les matériaux locaux et sous-produits issus de l'industrialisation au Burkina Faso (terre, carbure de calcium résiduel, déchets polymériques) peuvent être valorisés dans la construction. Ceci contribuant ainsi à la réduction des impacts négatifs des matériaux de construction sur l'environnement et consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation. Cette étude a évalué l'influence de la stabilisation par des fibres polymériques sur les performances des blocs de terre comprimés (BTC). Deux matrices de BTC, l'une contenant 0 % de CCR et l'autre 10 % de CCR ont été renforcées en fibres polymériques (0 ; 0,2 ; 0,4; 0,8; 1,2 % du poids sec de la matrice). Les BTC ont été produites à l'aide d'une presse mécanique TERSTARAM et maturées dans l'emballage pour maintenir une humidité constante à la température ambiante du laboratoire (30 ± 5 °C) pendant 45 jours. Après maturation, les propriétés physico-mécaniques et hygrothermiques des BTC fibrées ont été principalement étudiées. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres a causé la diminution de la résistance en compression (4,92-3,2 MPa) en fonction de l'augmentation du dosage en fibres (0-1.2 %). On observe également une baisse considérable de la conductivité thermique déjà à partir d'un dosage de 0,4 % de fibre (0,608 W/m.K) jusqu'à atteindre une valeur minimale de 0,391 W/m.K à 1,2 % de fibres.

Mots clés

1. Bloc de terre comprimée ;
2. Carbure de calcium résiduel ;
3. Fibres polymériques;
4. Résistance en compression ;
5. Conductivité thermique.

ABSTRACT

To promote the usage of local materials and by-products from Burkina Faso; soil, calcium carbide residue, and polymer waste can be used in modern housing construction in order to reduce the negative impacts of building materials and energy consumption for heating and cooling. Polymer fibers were used for the stabilization of compressed earth blocks (CEB) in order to investigate their influence on the performances of CEB. CEB containing 0 % CCR on one hand and 10 % CCR on the other hand were stabilized with polymer fibers (0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 % with respect to the dry mass of the matrix). CEB were produced using a mechanical press TERSTARAM and wrapped in plastic bag for curing at constant humidity at ambient temperature in the lab (30 ± 5 °C) for 45 days. After curing, the physico-mechanical and hygrothermal properties of the CEB were tested. The results showed that the addition of fibers decreased the compressive strength from 4,92 MPa with 0 % fiber to 3,2 MPa with 1.2 % fibers for CEB containing 10 % CCR. The decrease of the thermal conductivity was also noticed from a dosage of 0,4 % fiber (0,608 W/m.K) until reaching a minimum value of 0,391 W/m.K with 1,2 % of fibers.

Keywords:

1. Compressed Earth Blocks;
2. Calcium carbide residue;
3. Polymer fibers;
4. Compressive strength;
5. Thermal conductivity.

LISTE DES ABREVIATIONS

BTC : Bloc en terre comprimé

CV : Coefficient de variation

D : Densité

LEMHaD : Laboratoire Eco Matériaux et Habitat Durable

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement

W : Teneur en eau

M1 : Masse humide du matériau

M2 : Masse sèche du matériau

Wl ou LL : Limite de liquidité

Wp ou Lp : Limite de plasticité

V : volume de la terre

Ip : Indice de plasticité

Ic : Indice de consistance

W : Teneur en eau

F : la Charge de rupture en N

C : capacité thermique

Cp: Chaleur spécifique

Rt : résistance à la traction

CCR : Carbure de calcium résiduel

SOMMAIRE

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES ANNEXES	6
INTRODUCTION	7
I. OBJECTIF DU TRAVAIL	8
Chapitre 1: GENERALITES SUR LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION A BASE DE TERRE	9
1.1 Généralités sur la construction terre	9
1.1.1 Constructions en terre crue	10
1.1.1.1 Murs en pisé.....	11
1.1.1.2 Murs à ossature bois.....	11
1.1.1.3 Murs composés d'éléments.....	12
1.1.1.4 Blocs de terres comprimées	13
1.1.2 Constructions en terre plus élaborée.....	14
1.1.2.1 La terre cuite	14
1.1.2.2 La terre stabilisée	14
1.2 Généralités sur la terre stabilisée.....	14
1.2.1 Définition	14
1.2.2 Objectifs	15
1.2.3 Briques en terre stabilisées et matériaux entrant dans leur production.....	15
1.2.3.1 La terre	19

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

1.2.3.2	Les stabilisants et leurs effets sur les performances des BTC.....	20
1.2.3.3	L'eau de gâchage	24
Chapitre 2: ETUDE EXPERIMENTALE.....		25
2.1	Essais sur les matériaux entrant dans la constitution des BTC.....	25
2.1.1	La terre	25
2.1.1.1	Analyse minéralogique et chimique.....	26
2.1.1.2	Teneur en eau	26
2.1.1.3	Teneur en sable et en argile	26
2.1.1.4	Détermination des limites d'Atterberg.....	27
2.1.1.5	Poids spécifiques au pycnomètre à l'air.....	29
2.1.2	Le liant hydraulique	29
2.1.3	Les fibres polymériques	30
2.1.4	L'eau de gâchage	30
2.2	Processus de production des BTC	30
2.2.1	Méthode de dosage des briques	31
2.2.2	Malaxage.....	32
2.2.3	Production	32
2.2.4	Stockage et Maturation.....	32
2.2.5	Etude des propriétés des BTC	32
2.2.5.1	Propriétés physiques	32
2.2.5.2	Propriétés mécaniques	35
2.2.5.3	Propriétés thermiques.....	36
Chapitre 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS		38
3.1	Résultats d'essais d'identification de la terre et du CCR	38
3.1.1	Limites d'Atterberg.....	38
3.1.2	Distribution granulaires.....	38
3.1.3	Composition chimique et minéralogiques.....	39
3.1.3.1	Composition minéralogique.....	39

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

3.1.3.2	Composition chimique.....	41
3.2	Résultats des essais sur les BTC.....	41
3.2.1	Propriétés physiques.....	41
3.2.1.1	Porosité et densité apparente.....	41
3.2.1.2	Absorption capillaire.....	43
3.2.1.3	Absorption totale.....	43
3.2.2	Propriétés mécaniques.....	44
3.2.2.1	Résistance à la compression sèche.....	44
3.2.2.2	Résistance à la compression humide.....	45
3.2.2.3	Résistance en traction	46
3.2.3	Propriétés thermiques.....	47
3.2.3.1	Conductivité thermique.....	47
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		50
BIBLIOGRAPHIE		51
ANNEXES		52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic Buzau mai 2010	13
Tableau II: Variétés des briques (CCL Bulletin 2)	18
Tableau III: Utilisation des BTC pleines en fonction du dosage en stabilisant (CCL Bulletin 2)	18
Tableau IV: Dimensions moyennes des particules	26
Tableau V: Normes Indice de plasticité	28
Tableau VI: Formulation avec chaux et fibres	31
Tableau VII: Formulation sans chaux avec fibres	31
Tableau VIII : Conductivité de quelques matériaux	37
Tableau IX: Résultats des essais sur la terre de Kamboinsin	38
Tableau X: Composition chimique de la terre de Kamboinsin	41
Tableau XI: Composition chimique du CCR	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Les différentes techniques de construction en terre (Anger & Fontaine, 2009).....	10
Figure 1-2: Mur en Pisé.....	11
Figure 1-3: Bousillage-Torchis	12
Figure 1-4: Fabrication des adobes.....	12
Figure 1-5: Mur en bauge.....	12
Figure 1-6: Briques en terre cuite.....	14
Figure 1-7: Blocs de Terre comprimée.....	14
Figure 1-8: Cycle de production des blocs	17
Figure 2-1: Fibres plastiques	30
Figure 2-2: Conductivité thermique	36
Figure 3-1: Granulométrie de la terre et du CCR.....	38
Figure 3-2: Thermogramme du CCR	39
Figure 3-3: Thermogramme de la terre	40
Figure 3-4: Densité Apparente des BTC contenant 10% de CCR	41
Figure 3-5: Porosité accessible à l'eau et Porosité totale des BTC contenant 10% de CCR	42
Figure 3-6: Absorption capillaire à 10 min des BTC contenant 10% de CCR	43
Figure 3-7: Résistance à la compression sèche des BTC contenant 10% de CCR	44
Figure 3-8: Résistance à la compression sèche des BTC sans CCR.....	44
Figure 3-9: Résistance à la compression humide des BTC contenant 10% de CCR	45
Figure 3-10: Résistances en traction des BTC contenant 10% de CCR.....	46
Figure 3-11: Résistances en traction des BTC sans CCR	47
Figure 3-12: Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR	48
Figure 3-13: Variation de la diffusivité en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR.....	49
Figure 3-14: Variation de la chaleur spécifique en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR	49

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Absorption capillaire des BTC contenant 10% de CCR	52
Annexe 2: Résistances à la compression sèche et humide des BTC	53
Annexe 3: Analyse minéralogique de la terre de Kamboinsin et du CCR par XRD.....	54
Annexe 4: Porosité accessible à l'eau en fonction de la densité apparente des BTC avec 10% de CCR.....	55
Annexe 5: Conductivité thermique et Diffusivité des BTC avec 10% de chaux.....	56
Annexe 6: Essai d'absorption capillaire et d'absorption totale des BTC avec 10% de CCR	57
Annexe 7: Propriétés physiques des BTC contenant 10% de CCR.....	58

INTRODUCTION

Depuis des temps très anciens, la terre a été utilisée dans la construction. Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme de disposer d'une grande variété de matériaux de construction, l'utilisation de la terre comme technique dans le domaine de la construction reste toujours très répandue et fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques. C'est un matériau écologique qui présente d'énormes avantages sociaux et économiques aussi bien pour les pays développés que sous-développés. Majoritairement utilisée depuis des millénaires, la terre est toujours employée au Burkina Faso, notamment pour les habitations dans les régions rurales. Une des raisons de l'importance de la terre dans la construction est sa disponibilité.

Elle présente également l'avantage de pouvoir être utilisée de manière extrêmement diversifiée (l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée), offrant ainsi une grande palette de possibilités aussi bien architecturales qu'esthétiques. La technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente dans l'histoire des techniques de construction en terre. Elle permet d'avoir des blocs d'un format très souple sur le plan de la maçonnerie et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage que comme matériau principal dans un mur porteur.

Dans le souci de palier à ses inconvénients tels que sa faible résistance, plusieurs recherches ont été menées en utilisant différents moyens de stabilisation à base de ciment, de chaux, de bitume, de fibres en vue d'améliorer aussi bien sa performance mécanique que sa sensibilité vis-à-vis de l'eau. La recherche menée par le Laboratoire Eco-matériaux et Habitat Durable du 2iE (LEMHaD-2iE) a pour objectif principal la valorisation des matériaux locaux, par le recyclage de certains, en produisant des Blocs de terre comprimée issues de sous-produits industriels ayant de bonnes résistances mécaniques, pouvant répondre aux besoins de la population et aux conditions thermiques du Burkina Faso, ce qui pourrait même agir sur l'impact environnemental et réduire la pollution dans nos pays africains par ces différents résidus. Tout au long de notre étude nous avons tenté de trouver une réponse à notre question: Comment stabiliser la terre crue pour la construction au Burkina Faso. Il traitera donc particulièrement de la typologie que constitue la brique de terre comprimée (BTC) stabilisée, qui représente l'un des modes de construction en terre crue des plus rapides, fiables et résistants.

Le mémoire actuel présente, les résultats et analyses relatives sur le renforcement des Blocs de Terre Comprimée à l'aide d'un mélange de polymères (fibres plastiques) et de carbure de calcium résiduel.

Outre l'introduction générale, ce travail est structuré en trois chapitres:

- le premier propose une généralité sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC).
- le deuxième chapitre fait le point sur l'étude expérimentale, les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés et leurs différents dosages pour la production des BTC
- le troisième présente les résultats et les discussions de l'étude expérimentale.

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats et les recommandations pour terminer notre étude. Ces résultats montrent l'effet de la teneur en fibres plastiques sur les propriétés mécaniques et thermiques du BTC.

I. OBJECTIF DU TRAVAIL

• Contexte et Problématique

En vue de la disponibilité en grande quantité de carbure de calcium résiduel qui est un produit de rejet issu de divers gaz, et des sachets plastiques (difficilement dégradables), qui causent d'énormes problèmes environnementaux et économiques. Soucieux de valoriser ces déchets, le laboratoire LEMHaD s'est engagé, à étudier les possibilités de recyclage de ces importantes quantités de déchets dans les divers secteurs de la construction en génie civil. La valorisation des matériaux locaux est donc une nécessité dans l'optique du développement durable

• Objectif

L'objectif général de ce projet est l'amélioration des connaissances sur les effets des fibres polymériques sur les BTC, considérées comme des déchets en vue de leur valorisation, permettre l'utilisation fréquente de ces matériaux. Pour atteindre cet objectif dit général, il nous faut remplir quelques objectifs spécifiques comme :

- la caractérisation des matières premières
- la détermination des performances physiques des BTC contenant des fibres polymériques.
- l'investigation de l'influence des fibres polymériques sur les propriétés mécaniques des BTC

Chapitre 1: GENERALITES SUR LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION A BASE DE TERRE

La terre est sans doute le matériau de construction le plus vieux du monde. Un tiers de la population mondiale vit encore dans un habitat en terre. L'intérêt pour le matériau "terre" jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux considérés plus "nobles". Elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les différents pays du monde. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables. L'emploi de la terre étant destiné à des fins multiples, dans ce chapitre nous présenterons les généralités sur la terre en tant que matériau de construction.

1.1 Généralités sur la construction terre

Terre crue, « banco »(en Afrique de l'ouest) ou « adobe » sont les termes utilisés pour désigner la terre utilisée avec le moins de transformations possible en tant que matériau de construction. Grâce à une connaissance qui n'est qu'empirique, donc difficilement transmissible, on construit en terre depuis des millénaires. Les modes de construction en terre sont très variés. La terre peut être moulée, modelée, compactée, compressée. Pour chaque cas, il existe plusieurs technologies, de la plus naturelle et artisanale à la plus industrialisée.

Cette diversité est due à la fois aux types de terres rencontrées et aux matériels disponibles et/ou développés localement. Elle a ainsi entraîné une architecture très variée de par le monde. On peut présenter les principaux modes d'utilisation de la terre en les classant en fonction de l'état d'humidité de la terre au moment de son utilisation, et en fonction du mode de mise en œuvre du matériau. Plusieurs techniques de construction utilisent la terre crue comme matériau structurel : le pisé, la bauge, l'adobe, le torchis, le bousillage, la brique de terre compressée. D'autres techniques, utilisent la terre crue comme matériau de remplissage (souvent entre les éléments d'une ossature en bois) : le torchis, la terre-paille, la terre, les copeaux bois. Il est encore possible d'utiliser la terre crue en tant qu'enduit sur un support en terre crue ou non. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentées sur le diagramme établi par Anger & Fontaine, 2009 (figure 1-1)

Parmi les plus courants, on distingue 2 catégories de construction en Terre :

- les constructions en terre crue
- les constructions en terre plus élaborée

1.1.1 Constructions en terre crue

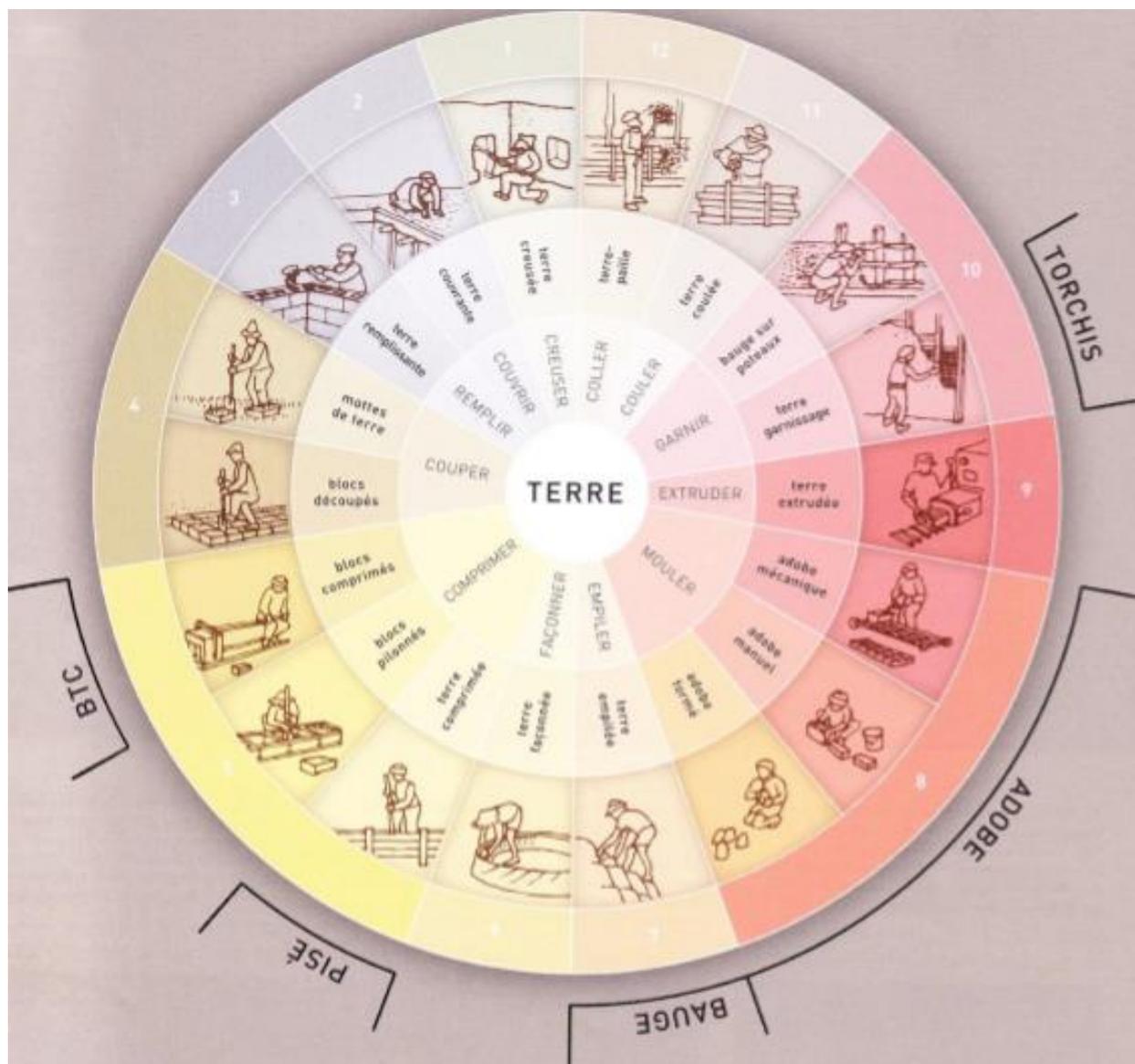


Figure 1-1: Les différentes techniques de construction en terre (Anger & Fontaine, 2009)

1.1.1.1 Murs en pisé

La construction en pisé est encore utilisée dans de nombreux pays du monde. C'est un mur fait de terre argileuse délayé avec des cailloux, de la paille et comprimée dans des coffrages directement sur les fondations. La méthode permet d'élever des murs par section successive d'un seul tenant avec la terre comme sur la figure 1-2. Le pisé est utilisé comme matériau porteur. La construction en pisé est devenue très marginale même dans les régions où elle était la principale technique constructive et où la main d'œuvre est mal rémunérée, à cause de son énorme besoin de main d'œuvre et de la disparition des modes de travail communautaire



Figure 1-2: Mur en Pisé

1.1.1.2 Murs à ossature bois

Le bousillage est un terme technique utilisé en construction pour désigner une opération de maçonnerie à l'époque de la Nouvelle-France (Canada et Acadie) et en Louisiane française. Le bousillage consiste à préparer un mortier le plus souvent un torchis fait d'un mélange de chaume de mousse espagnole et de terre détrempée dont on se sert pour construire surtout des murs de clôture, des chaumières et des granges. La figure 1-3 montre un bousillage

On distingue deux types de bousillage :

- Le bousillage des fondations
- Le bousillage des murs



Figure 1-3: Bousillage-Torchis

1.1.1.3 Murs composés d'éléments

❖ L'adobe

L'adobe est de l'argile qui, mélangée avec l'eau et une faible quantité de paille hachée ou d'un autre liant, peut être façonnée en briques séchées au soleil. Par extension, l'adobe (ou banco) est la brique de terre crue, moulée et séchée au soleil (voir céramique) et utilisée comme matériau de construction. Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde.



Figure 1-4: Fabrication des adobes



Figure 1-5: Mur en bauge

❖ La bauge

La bauge est un système de construction monolithique en terre crue empilée. La terre est dans un état plastique, généralement mélangée à des fibres (végétales ou animales). Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage, alors que le matériau n'est pas trop dur. La bauge est une technique de construction ancienne, répandue dans toute l'Europe (en France) ainsi qu'en Afrique, Asie et Amérique. En France, les constructions en bauge ont été majoritairement édifiées aux cours de la période qui va du XVIII^e au milieu du XX^e siècle. Ce moyen de construction écologique est à nouveau employé puisque les matières premières sont

prélevées sur le site même et que les murs en terre et végétaux isolent correctement et possèdent une grande inertie thermique. La figure 1-5 montre un mur en bauge.

1.1.1.4 Blocs de terres comprimées

C'est une version moderne de l'adobe. Les blocs de terre comprimées sont fabriqués à partir d'une terre sablo-argileuse dont la dimension des particules ne dépasse pas 20 mm. Ce matériau est utilisé comme matériau porteur ou de remplissage. Le problème de résistance à l'eau du matériau en terre brute reste posé dans les zones tropicales humides quand bien même divers procédés de protection de ces constructions (débordements de toitures, enduits hydrofuges sur les murs) sont souvent utilisés. Cette technique a l'intérêt de permettre la mise en place d'un contrôle de qualité simple des matériaux pendant leur fabrication, et d'utiliser, en les adaptant, les connaissances locales des maçons pour leur mise en œuvre. Figure1-7

Tableau I: les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic Buzau mai 2010

CARACTERISTIQUES	TYPES DE BRIQUES DE TERRE CRUE		
	ADOBE	PISE	BTC
Masse volumique (kg/m ³)	1200 – 1700	1700 – 2200	1700 – 2200
Résistance à la compression (MPa)	2 -5	2	> 2,4
Résistance à la traction (MPa)	-	0,5 – 1	-
Conductivité thermique λ (W/m°C)	0,46 – 0,81	0,81 – 0,93	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique (J/Kg°C)	900	850	-
Capacité thermique (KJ/m ³ °C)	1350	510	-
Absorption d'eau (%)	5	10 – 20	10 – 20
Isolation acoustique (dB)	-	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1 – 2	0,2 - 1

1.1.2 Constructions en terre plus élaborée

1.1.2.1 La terre cuite

La terre cuite est un matériau céramique obtenu par la cuisson d'argile (ou glaise). Elle est utilisée pour réaliser des poteries, des sculptures et pour la fabrication de matériaux de construction, briques, tuiles ou carreaux.



Figure 1-6: Briques en terre cuite



Figure 1-7: Blocs de Terre comprimée

1.1.2.2 La terre stabilisée

C'est un mélange d'argile sableuse, d'eau et une quantité d'agents stabilisants destinée à accroître la résistance du matériau à la compression et à l'humidité. La stabilisation consiste donc à consolider les qualités naturelles de la terre pour obtenir un matériau de construction durable. Les agents communément employés pour la stabilisation sont la chaux, le ciment portland et les émulsions de bitumes ou de résines, des savons...

1.2 Généralités sur la terre stabilisée

1.2.1 Définition

Stabiliser la terre consiste à lui donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. De nombreux paramètres intervenant dans la stabilisation dépendent autant de la conception des bâtiments, de la qualité des matériaux, de l'économie du projet, que de la durabilité. Lorsque l'on décide de stabiliser la terre, c'est-à-dire de « modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière » (Guillaud & Houben, 1995), il faut d'abord étudier :

- les propriétés de la terre à stabiliser ;
- les améliorations envisagées ;
- l'économie du projet, c'est-à-dire les coûts et délais de réalisation ;
- les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet et les systèmes constructifs ;
- la maintenance du projet réalisé, c'est-à-dire le coût d'entretien.

1.2.2 Objectifs

On ne peut intervenir que sur deux propriétés de la terre : sa structure et sa texture. On dispose de trois possibilités d'intervention sur ces caractéristiques :

- agir sur la porosité, en réduisant le volume des vides entre les particules
- agir sur la perméabilité, en colmatant les vides qui ne peuvent être supprimés
- agir sur la résistance mécanique, par l'amélioration des liens entre les particules.

1.2.3 Briques en terre stabilisées et matériaux entrant dans leur production

Pour la fabrication des briques en terre stabilisée (blocs en terre comprimée : BTC), la terre subit un traitement plus judicieux et plus rigoureux ceci en raisons de certains éléments qui viennent s'y ajouté. Il s'agit essentiellement du ciment qui nécessite des conditions particulières pour faire prise. Mais avant tout cela, il convient de connaître les domaines d'utilisation des BTC.

Les BTC sont constituées par un liant hydraulique, de terre non organique et de l'eau. Ce sont des blocs de terre compactée dans une presse. C'est une approche quasi industrielle de l'adobe, dans la mesure où il y a une standardisation du modèle fabriqué et un accroissement de la productivité lié à l'utilisation de machines, parfois rudimentaires, mais aussi perfectionnées et multitâches. L'utilisation d'une presse permet d'avoir des éléments parfaitement calibrés. Le modèle le plus couramment fabriqué a les dimensions suivantes : 29,5 x 14 x 9 cm, mais il suffit de changer le moule de la presse pour avoir d'autres modèles de BTC. La compression de la terre dans le moule est l'origine de sa bonne résistance mécanique après séchage.

On distingue plusieurs types de blocs

❖ Les Blocs pleins

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipédique, hexagonal) et leur usage est très divers. On peut en distinguer plusieurs types en fonction de leur dimension :

- Les grandes briques
- Les petites briques
- Les grandes plaquettes
- Les petites plaquettes
- Les pavés hexagonaux

❖ Les Blocs évidés

On observe généralement de 5 à 10 % d'évidement, voire 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation des chaînages (coffrages perdu).

❖ Les Blocs alvéolaires

Ils ont l'avantage de leur légèreté, mais exigent des moules sophistiqués ainsi que des pressions de compression élevés. Ils sont souvent utilisés pour des ouvrages non porteurs.

❖ Les Blocs à emboîtement

Ils permettent de se passer du mortier par leur assemblage, mais exigent comme les blocs alvéolaires des moules sophistiqués et des pressions de compressions élevés. Ils sont aussi, souvent utilisés pour des ouvrages non porteurs.

La production de ces différents types de briques s'effectue selon la figure 1-8 :

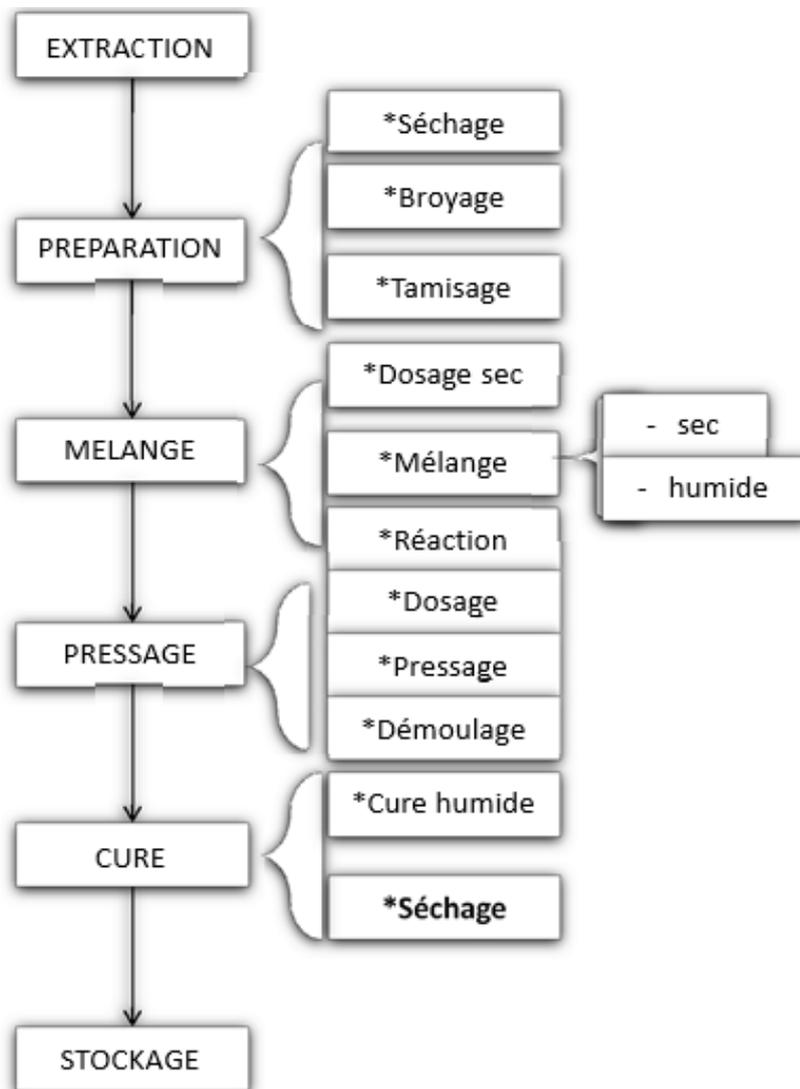


Figure 1-8: Cycle de production des blocs

Ce cycle de production conduit à la fabrication de briques dont les dimensions sont consignées dans le tableau suivant. Et il est à noter que la technique de formation demeure identique malgré les dimensions variables des briques.

Tableau II: Variétés des briques (CCL Bulletin 2)

Variétés des briques	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)	Volume (cm)	Poids (kg)
Grandes briques	29.5	14	9,5	3,924	7
Petites briques	22	14	9,5	2,926	5,3
Grandes palettes	22	10,5	9,5	2,195	4
Petites palettes	22	10,5	6	1,386	2,5
Pavés hexagonaux	22	25	6	20,3	3,7

Les BTC sont utilisées dans de nombreuses parties du bâtiment. Le tableau 1-4 en expose quelques-uns en fonction du dosage.

Tableau III: Utilisation des BTC pleines en fonction du dosage en stabilisant (CCL Bulletin 2)

Dosage	Mélange		Champ d'utilisation
	Ciment	Terre	
6 %	1 paquet	11 brouettes arasées	<ul style="list-style-type: none"> - Cloisons - Parements de sols ou murs (décoration, claustras...)
8 %	1 paquet	9 brouettes arasées	<ul style="list-style-type: none"> - Murs de clôture - Murs porteurs de moindres importances - Pavage au sol
10 %	1 paquet	7 brouettes arasées	<ul style="list-style-type: none"> - Murs porteurs - Fondations-soubassement - Toiture - Citerne - Pièce - Arcade

La construction en BTC est une technologie dont le but est l'utilisation de matériaux locaux, c'est-à-dire disponibles dans les alentours immédiats du site de construction. Les exigences résident uniquement au niveau des caractéristiques mécaniques requises pour le bâtiment en fonction de l'utilisation qui en sera faite. Les sols sont constitués par des mélanges, en proportion différentes, de quatre sortes d'éléments : les sables, les silts, les argiles et les graviers. Le comportement de chacun de ces éléments lui est spécifique ; par exemple lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité, certains changent de volume, d'autre non.

1.2.3.1 La terre

➤ Critères de choix

Nous avons besoin de connaître la terre que nous allons utiliser pour la réalisation des BTC, ses différentes caractéristiques et propriétés. Tout cela dépend alors du prélèvement qui doit être fait avec soin. Un seul échantillon de terre ne doit jamais être considéré comme représentatif de ses caractéristiques. Il est fait manuellement le plus souvent avec des outils agricoles (pioche, pelles, bèches).

➤ Méthode de prélèvement

- 1) Faire des trous carrés A, B, C de 1m de côté environ,
- 2) Enlever la terre végétale reconnaissable à sa couleur brune et noirâtre ou franchement noire avec des débris végétaux
- 3) Faire des prélèvements systématiques d'environ 10 kg dans chaque trou aux profondeurs de 1 m, 1,5 m, 2 m, soit au total 15 prélèvements que l'on se gardera surtout de mélanger.

Pour cela on mettra chaque échantillon dans un récipient (sceau, sac...) avec obligatoirement une étiquette portant les précisions inaltérables suivantes :

- La spécification du trou (la lettre A par exemple)
- La profondeur (1 m par exemple)
- La provenance (village ou localité)
- Le nom et l'adresse du demandeur des analyses et essais
- La date du prélèvement

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

Ces exigences ne sont utiles que lorsque le projet de construction comporte plusieurs bâtiments d'importance. S'il ne s'agit que d'un ou deux bâtiments on peut se contenter de deux trous voire un seul, mais on maintiendra cependant les autres recommandations.

➤ Les études préliminaires

Pour qu'une construction en terre (naturelle, battue ou stabilisée) présente de sérieuses garanties quant à la durabilité qui est un facteur essentiel, il convient de faire quelques études préliminaires sur la matière première elle-même :

- La détermination du contenu du sable et d'argile
- L'analyse granulométrique

1.2.3.2 Les stabilisants et leurs effets sur les performances des BTC

➤ Procédés de stabilisation

La terre stabilisée est l'une des évolutions dans l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Stabiliser une terre consiste à lui donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. On distingue trois procédés de stabilisation

- **La stabilisation mécanique** : consiste à modifier les caractéristiques de la terre en intervenant sur sa structure ; c'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.
- **La stabilisation physique** : les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture : mélange contrôlé de fraction de grains différents.
- **La stabilisation chimique** : on ajoute à la terre d'autres matériaux ou des produits chimiques qui modifient ses propriétés. Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :
 - Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
 - Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari,1989).

➤ Stabilisation par liants hydrauliques

Afin d'améliorer ces différentes propriétés, on peut ajouter un stabilisant à la terre. Néanmoins, il convient d'en choisir un approprié à la variété de terre utilisée. On dénombre plus d'une centaine de produits pouvant être utilisés comme stabilisant dans la construction en terre, qu'ils soient ajoutés dans la masse ou dans l'enduit. Bien qu'étudiée depuis les années 1920, la stabilisation ne

connaît toujours pas de « recette miracle » pouvant répondre à tous les besoins. Les méthodes les plus pratiquées sont celles de : la densification par compression, l'addition de ciment ou de chaux à la terre ou encore le mélange de la terre avec du bitume.

❖ Stabilisation par la chaux

La chaux est un excellent stabilisant pour la terre crue et ce mode de stabilisation se prête très bien au procédé de moulage par compression. Néanmoins, avec la chaux, il existe un dosage idéal pour chaque type de terre. L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un braisage des mottes. La chaux doit être mise en œuvre avec une argile finement broyée afin d'être plus efficace. De plus, un temps de retenue de minimum deux heures (8 à 16 heures étant préférables) est exigé pour permettre à la chaux de réagir avec la terre (CRATerre-EAG, 1995 ; Agridoc, 2004). Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile, et à travers la réalisation d'éprouvettes traitées à la chaux et compressées, Toubeau (Toubeau,1987) a pu suivre l'évolution des réactions sol-chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part, sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude, lui a permis de faire un classement par ordre décroissant : kaolinite, > illite, >smectite. Les résistances mécaniques générales s'améliorent significativement avec l'augmentation de la proportion de chaux. La stabilisation à la chaux hydraulique est comparable à la stabilisation au ciment Portland, que cela soit au niveau de leur comportement, de leurs caractéristiques ou de leur façon de travailler (GATE, 1994). Le carbure de calcium résiduel est surtout conseillé pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant $IP > 17$ et $LL > 40$. Le temps de cure des BTC stabilisées à la chaux doit être de 90 jours ou au minimum 45 (Doctor E.A Adam et all 2001).

La stabilisation à la chaux peut se décomposer en cinq mécanismes :

- l'absorption d'eau de la terre humide par la chaux.

Cette hydratation est accompagnée par un important dégagement de chaleur.

- l'échange cationique des ions de calcium de la terre humide

Les ions calcium se substituent aux cations échangeables de la terre.

- la floculation et l'agglomération des particules de terre

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

Suite au nombre plus important d'électrolytes dans l'eau interstitielle dû à l'échange de cations précédant, ce qui entraîne un changement de texture et de structure.

- la carbonatation

« La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des produits cimentaires carbonatés médiocres » (Guillaud & Houben, 1995).

- la réaction pouzzolanique.

Cette dernière produit en effet un environnement alcalin dans lequel se dissolvent les minéraux aluminosilicates. La silice et l'alumine des argiles se recombinent alors avec le calcium, formant des silicates d'aluminates et de calcium qui va cimenter les grains entre eux

Des essais ont été menés avec la terre du Burkina Faso plus précisément celle de Kamboinsin pour former des BTC. L'évaluation de la capacité de stabilisation dans les BTC a donc été étudiée dans la suite de notre travail.

➤ **Stabilisation par les fibres**

La stabilisation par les fibres a été longtemps utilisée notamment celle faite à base de paille. Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection de blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Pour renforcer les briques de terre crue, il existe une autre technique faisant usage d'armatures fibreuses qui convient bien à la pratique de briques comprimées. La résistance apportée par des fibres permet de résoudre d'autres problèmes rencontrés sur les briques de terre crue, que la stabilisation avec addition ne peut pas forcément solutionner.

Elles agissent sur les résistances mécaniques, les performances thermiques et encore d'autres aspects :

- augmentation importante de la résistance en traction, et souvent des résistances en flexion et compression,
- réduction de la fissuration et réduction des variations dimensionnelles dues au séchage des argiles grâce à l'effort distribué dans tous les sens par les fibres,
- accélération du séchage, par l'effet drainant des canaux de fibres,

- Allègement des blocs, et amélioration de la conductivité thermique par l'introduction d'une plus grande quantité d'air grâce aux fibres.

On distingue plusieurs types de fibres :

- les fibres organiques
- les fibres minérales
- les fibres synthétiques

Le comportement des blocs renforcés par des fibres est différent. A la rupture, les blocs armés restent en un seul morceau. Ils peuvent absorber une énergie plus importante grâce à la capacité de déformation des renforts. On observe en général une augmentation de la résistance en compression de l'ordre de 15% avec l'ajout de fibres selon HOUBEN et GUILLAUD, 1989.

❖ **Effet des fibres sur les performances physico-mécaniques des briques en terre**

- Millogo et al. (2014), ont étudié la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres de kénaf produites au Burkina-Faso dans le cadre de la formulation des blocs d'adobes comprimés. Ils ont varié les teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids dans deux longueurs (30 mm et 60 mm). Les résultats indiquent que la présence des fibres de kénaf améliore les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Le résultat le plus approprié a été obtenu avec l'utilisation de 30 mm de longueur de fibre. Ils ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques par l'absence de propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile.
- Sallehan et Yaacob (2011) quant à eux ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier améliore la résistance à la compression des BTC fibrés.
- Khedari et al (2005) ont étudié des briques à base d'argile latéritique comprimée et stabilisée par des fibres de coco. Les résultats indiquent une légère diminution de la résistance à la compression. Les auteurs ont justifié cette baisse de résistance par l'effet des dimensions, des conditions de surface et le nombre de fibres présentes dans un volume donné. Donc l'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, d'où une réduction de la résistance à la compression
- Sallehan et Yaacob (2011), après des essais d'absorption d'eau sur les BTC renforcés par les fibres brutes de palmier, ont conclu qu'il y'avait une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres.

- Ravishankar et Raghavan (2004) ont confirmé que pour les sols latéritiques stabilisés par la fibre de coco, le taux d'absorption de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de coco
- ❖ **Effet des fibres sur les performances thermiques**
- Khedari et al (2005). ont montré que la conductivité thermique des blocs de terre comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et que cette diminution atteint un taux important qui est de l'ordre de 50 %
- Cette même observation a été faite par Millogo et al. (2014)

Différents types de fibres ont été utilisés, pour stabiliser les BTC et pour déterminer leurs performances mécaniques et hygrothermiques. Notre travail a constitué à déterminer l'influence des fibres polymériques, que nous avons choisi en vue de leur valorisation sur les blocs de terres comprimées contenant 10% de chaux. Cela surtout en étudiant le comportement hygrothermique de ces BTC.

1.2.3.3 L'eau de gâchage

L'eau est nécessaire pour permettre au liant de jouer un rôle entre les agrégats. Elle va également avoir un rôle fluidifiant lors de la compression en entraînant les éléments les plus fins vers les espaces entre les plus gros. Le dosage en eau de gâchage est obtenu par rapport à la terre utilisée, en déterminant la teneur en eau optimale dépendant de la nature de cette terre, par l'essai Proctor ou manuellement en procédant à un dosage à vue d'œil avec la presse (calibrage).

Chapitre 2: ETUDE EXPERIMENTALE

L'objectif de notre mémoire a été d'étudier les caractéristiques des blocs de terre auxquels on aura à incorporer du carbure de calcium résiduel et des polymères. Au sein de ce chapitre nous exposerons la méthodologie du travail adoptée, les divers essais effectués et la méthode de traitement des résultats obtenus. L'ensemble des essais effectués pour la réalisation de cette étude a été exécuté à LEMHaD 2iE.

Pour étudier les caractéristiques des BTC, nous avons au préalable évalué les caractéristiques des divers éléments entrant dans sa constitution. Nous avons ensuite procédé à la confection des briques en fonction des différents dosages proposés, enfin nous avons réalisé les essais

2.1 Essais sur les matériaux entrant dans la constitution des BTC

Les matériaux qui ont servi dans le cadre de cette étude sont : la terre, le carbure de calcium résiduel, et les polymères (les fibres plastiques). Certains de ces éléments ont fait objet de différents essais pour leur caractérisation.

2.1.1 La terre

La terre, avec ses différents constituants est le constituant de base majoritaire des BTC. La terre utilisée pour cette recherche est l'argile qui provient de la carrière de Kamboinsin. Elle a une couleur qui tend vers le rouge. La préparation de la terre nécessite 3 étapes

- la préparation
- le séchage
- le tamisage au tamis de 5 mm (On recueille les passants)

Avant d'effectuer la stabilisation d'une terre, il est important et nécessaire de déterminer ses caractéristiques pour mieux :

- vérifier l'aptitude de la terre à stabiliser,
- déterminer le pourcentage du stabilisant et des performances techniques.

Les différents essais réalisés sur la terre ont porté sur l'analyse minéralogique et chimique, la teneur en eau, la teneur en sable et en argile, l'analyse granulométrique, la densité, les limites d'Atterberg, le poids spécifique.

2.1.1.1 Analyse minéralogique et chimique

Les propriétés d'un minéral argileux résultent de sa composition chimique et de sa structure. Cependant la faiblesse des connaissances scientifiques sur la composition chimique et les propriétés physico-chimiques, structurales et mécaniques de la plupart de ces matériaux naturels, limite leur utilisation et leur valorisation. Le principal constituant des argiles est la silice à laquelle s'ajoutent en proportions variables d'un matériau à un autre, les oxydes de divers éléments chimiques (fer, aluminium, magnésium, potassium, phosphore etc.). La teneur d'une argile en ces oxydes détermine sa couleur. Nous déterminons les caractérisations chimiques et minéralogiques par (la diffraction des rayons X). Cette étude permettra de savoir si notre terre est susceptible d'être utilisée dans le domaine de la construction.

2.1.1.2 Teneur en eau

Elle consiste à mettre à l'étuve à 100°C et pendant 24 heures une quantité M1 de terre considérée comme étant la masse humide de l'échantillon. La masse M2 affichée par cet échantillon après étuvage représente sa masse sèche.

Ainsi la teneur en eau est obtenue par la formule suivante :

$$Te = \frac{M1-M2}{M2} \times 100 \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

Te = Teneur en eau

M1 = Masse humide de la terre

M2 = Masse sèche de la terre

2.1.1.3 Teneur en sable et en argile

Indépendamment de sa composition chimique ou minéralogique, une terre contient en général divers constituants de tailles extrêmement variables. Cette caractéristique permet de classer les terres de la manière suivante :

Tableau IV: Dimensions moyennes des particules

Dimension moyenne des	5 cm	2 cm	2 mm	0,25 mm	0,05 mm	0,005 mm
Nomenclature	Pierre	Gravier	Sable grosier	Sable fin	Limon	Argile

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

La catégorie d'éléments allant de 5 cm à 2 cm (pierre et gravier) est d'un intérêt secondaire dans cette étude.

Les opérations de détermination des proportions de sable et d'argile se déroulent de la façon suivante:

- étuvage (séchage contrôlé) d'une certaine quantité de terre à environ 80°C puis détermination du poids de cette prise d'essai (exemple P1 = 100g). La pesée doit être réalisée jusqu'à poids constant ;
- lavage ensuite à l'eau de la terre. Pour cela on ajoute de l'eau propre et claire à la terre pesée ; on triture entre les doigts les grains de sable de façon à les débarrasser de leur « ciment naturel » qui reste en suspension dans l'eau et qu'on élimine. On poursuit l'opération jusqu'à ce qu'il ne reste plus que du sable propre, l'eau de lavage devant rester claire, limpide et propre. Le sable ainsi lavé est recueilli, étuvé à 80°C (jusqu'au séchage puis pesé jusqu'à poids constant P2).

Le pourcentage du sable est :

$$X = \frac{P2}{P1} \times 100 \quad \text{Équation 2}$$

Le pourcentage de l'argile est :

$$Y = 100 - X \frac{P1-P2}{P1} \times 100 \quad \text{Équation 3}$$

(Remarquons que $X + Y = 100 \%$)

2.1.1.4 Détermination des limites d'Atterberg

Parmi les paramètres qui définissent la nature du sol, les limites d'Atterberg sont très importantes. Elles sont des teneurs en eau pondérales caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers du sol sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction passant au travers du tamis 0,400 mm. La consistance d'un sol peut évoluer dans de larges limites lorsque sa teneur en eau varie. La terre peut être définie suivant quatre états : dur, friable, plastique et liquide.

Ces différents états sont séparés par des valeurs limites de teneur en eau qui varient assez largement suivant les matériaux. Les teneurs en eau qui marquent le passage d'un état à l'autre sont les limites

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

d'Atterberg. Elles servent à apprécier la plasticité d'un sol, (aptitude du sol à se déformer, sans changer de volume, sous une charge constante) et à comparer les matériaux.

Les deux limites les plus utilisées sont :

- ❖ **la limite de liquidité** : c'est la teneur en eau du sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique. Elle est notée WL ou LL. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande.

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche d'argile dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur un (1) cm. On mesure alors la teneur en eau de la pâte d'argile. Par définition, la limite de liquidité W, est la teneur en eau (exprimée en %) qui correspond à la fermeture en 25 chocs.

- ❖ **la limite de plasticité** : c'est la teneur en eau du sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide (le sol durcit et se fissure). Elle est notée Wp ou Lp.

Pour la déterminer, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité Wp est la teneur en eau (exprimée en %) du fuseau qui se brise en petits tronçons d'un (1) à deux (2) cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. Il faut donc arriver à réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans qu'ils ne se cassent. La connaissance de la limite de liquidité et de la limite de plasticité permet de définir l'étendue du domaine plastique du sol : c'est l'indice de plasticité noté Ip. Il précise les risques de déformations (gonflement, retrait) du sol et de calcul par la formule :

$$I_p = W_l - w_p \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

Ip = Indice de plasticité ;

Wl = Limite de Liquidité ;

Wp = Limite de plasticité

Tableau V: Normes Indice de plasticité

Indice de plasticité (Ip)	Etat du sol
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
40	Très plastique

L'indice de consistance I_c prend en compte la teneur en eau W du sol à l'état naturel.

$$I_c = \frac{Wl-w}{I_p} \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

I_c = Indice de consistance ; Wl = limite de liquidité ;

W = Teneur en eau ;

I_p = Indice de plasticité.

2.1.1.5 Poids spécifiques au pycnomètre à l'air

Cet essai nous permet de déterminer le poids volumique des grains solides des matériaux. Les matériaux sont pris directement sans lavage, chaque échantillon est pesé entre 600 g et 900 g directement dans le pycnomètre taré sur la balance, ensuite on ajoute de l'eau distillée en quantité supérieure à 300 cm³, l'appareil est refermé puis on injecte de l'air à l'aide d'une petite pompe qui se trouve sur l'appareil, ensuite l'aiguille est ramenée au point rouge et on fait la lecture de la pression

2.1.2 Le liant hydraulique

Le projet d'étude étant défini par l'utilisation des matériaux locaux et des sous-produits issus de l'industrialisation, le liant hydraulique sur lequel s'est porté notre choix est le carbure de calcium résiduel, il s'agit d'un résidu industriel qui n'est actuellement pas utilisé. Dès lors que l'on considère ce produit comme un déchet que l'on cherche à valoriser, on voit les choses autrement.

La préparation de notre carbure de calcium résiduel est faite en 3 étapes :

- le séchage
- le concassage
- le tamisage

Après l'obtention du carbure de calcium résiduel (le matériau brut), on a procédé au séchage au soleil et on l'a entreposé dans des sacs pendant 24 h au laboratoire à une température ambiante de (30±5 °C). On a ensuite concassé les blocs de carbure de calcium résiduel à l'aide d'une pelle, des fois grâce au concasseur à l'aide des boulets de plomb. Une fois le carbure de calcium résiduel réduit en poudre, il est passé au tamis de 125 micromètres, pour ne garder que la partie la plus fine.

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

On sait que la finesse des particules influence fortement la réactivité des poudres. La surface spécifique s'avère plus faible en comparaison avec les autres matériaux examinés.

2.1.3 Les fibres polymériques

Dans notre cas nous avons utilisé des fibres synthétiques plus précisément des fibres plastiques recyclées. La préparation des fibres plastiques se fait suivant 3 étapes :

- collecte des sachets plastiques
- séchage au soleil
- découpages des fibres ayant une dimension précise ($e=5\text{mm}$, $L=3\text{cm}$).

Ce sont des dimensions que nous nous sommes fixées pour notre recherche. L'introduction des fibres dans les BTC nécessite non pas une granulométrie fine mais une bonne séparation des fibres et une longueur de fibres précise. Nous avons constaté que suivant les études moins les fibres sont grandes plus elles améliorent la résistance et le contraire améliore plutôt la conductivité thermique. Les études qui seront menées plus tard permettront de déterminer l'effet de l'ajout de nos fibres plastiques sur les performances de nos BTC.



Figure 2-1: Fibres plastiques

2.1.4 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage à utiliser doit être propre et ne doit pas contenir des matières en suspension et des sels au-delà d'une certaine limite. Aussi l'eau qui a été utilisé pour cette étude est celle de la consommation courante fournie par l'ONEA du Burkina Faso. Aucun essai, ni traitement n'a été réalisé sur l'eau de gâchage utilisée.

2.2 Processus de production des BTC

Une fois les matières premières choisies et dosées, la production des blocs de terre comprimée peut débuter. Au vu des difficultés de préparation de matériaux mentionnées

ci-dessus, les formulations ont été réalisées au fur et à mesure de l'avancement des quantités préparées. Dès que les matériaux étaient prêts, nous commençons les formulations.

2.2.1 Méthode de dosage des briques

Dans le but d'atteindre notre objectif qui est de déterminer l'influence du dosage des polymères et du carbure de calcium résiduel, les caractéristiques des BTC que nous avons réalisés présentaient différentes formulations :

Etant donné que le dosage à 10% de carbure de calcium résiduel donne les meilleurs résultats pour les stabilisations avec l'argile, nous avons choisi de considérer ce dosage pour notre stabilisation. Pour les fibres le dosage conseillé est de 0,2-0,8 % .Nous sommes allés jusqu'à 1,2% pour étudier le comportement de nos BTC fibrés au-delà de cette valeur.

- **Avec chaux et fibres**

Tableau VI: Formulation avec chaux et fibres

Désignation	La chaux %	Les fibres %
L10F0 (témoin)	10	0
L10F0,2	10	0,2
L10F0,4	10	0,4
L10F0,8	10	0,8
L10F1,2	10	1,2

- **Sans chaux avec fibres**

Tableau VII: Formulation sans chaux avec fibres

Désignation	La chaux %	Les fibres%
LOF0 (témoin)	0	0
LOF0,2	0	0,2
LOF0,4	0	0,4
LOF0,8	0	0,8
LOF1,2	0	1,2

2.2.2 Malaxage

Le malaxage est important car il faut que le mélange soit homogène pour permettre la répartition de tous les éléments composant la formulation. Il peut se faire manuellement ou mécaniquement à l'aide d'un malaxeur. Dans notre cas nous l'avons fait manuellement. Il faut mélanger les dosages à sec en premier et au fur à mesure ajouter de l'eau pour en perdre le moins.

2.2.3 Production

La masse totale des briques est variable car elle dépend de la quantité de matière introduite directement dans le moule. De par sa conception, la presse possède une capacité de compression dépendant de la quantité introduite. Plus on met de matériau, plus l'effort nécessaire à la compression sera important. Il faut alors procéder à un calibrage pour permettre un effort de compression assez raisonnable aux ouvriers qualifiés pour cette production. Dans notre cas la presse manuelle a été utilisée. On remplit le moule, on exerce une pression avec les doigts sur les angles du bac doseur pour les renforcer puis on compacte le mélange. On procède ensuite au démoulage. L'intérieur du moule est régulièrement lubrifié à l'huile à moteur, lui conférant ainsi une surface lisse et des arêtes vives facilitant le glissement de la pâte de terre compressée à l'intérieur de celui-ci. Les BTC une fois démoulées sont conservées à l'ombre, à l'abri du soleil et des intempéries pour éviter au mieux les risques de fissuration lors de la prise.

2.2.4 Stockage et Maturation

Les BTC ainsi formées sont stockées minutieusement et étiquetées. Les briques contenant la chaux sont conservées dans des sachets plastiques pour permettre de conserver l'humidité pour que la réaction entre la chaux et la terre soit meilleure à une température près de $(30 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C})$ au sein du laboratoire.. Dans notre cas, le temps de maturation a été de 45 jours.

2.2.5 Etude des propriétés des BTC

Les propriétés des BTC dépendent de nombreux paramètres tels que la terre utilisée, la méthode de compactage, l'utilisation d'un stabilisant. De ce fait, elles sont difficilement quantifiables car elles varient d'une production à l'autre

2.2.5.1 Propriétés physiques

➤ La porosité et la densité

La porosité est l'ensemble des vides d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides. C'est une grandeur physique entre 0 et 1, qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat.

Il existe trois types de porosité :

- la porosité accessible à l'eau
- la porosité fermée
- la porosité totale.

La porosité accessible à l'eau des échantillons et des BTC a pu être évaluée pendant cette étude. Noté ε (%), ce paramètre physique des échantillons a été déterminé selon la norme française NF P18-459 [94]. Le principe de la méthode consiste à saturer le réseau poreux du matériau avec un liquide ayant une densité connue (l'eau a été utilisée dans cette étude), puis procéder à la détermination de trois pesées sur chacun des échantillons soumis à l'épreuve. Ceci permet d'évaluer la porosité accessible à l'eau (ε) et la masse volumique apparente (ρ) des différents échantillons grâce aux formules suivantes :

$$\varepsilon_{acc} = 100 \times \frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \quad \text{Équation 6}$$

$$\rho_{app} = \frac{M_{sec} \times \rho_{eau}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \quad \text{Équation 7}$$

$$\varepsilon_{fer} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{acc} \quad \text{Équation 8}$$

$$\varepsilon_{tot} = 100 \times \frac{\rho_d - \rho_{app}}{\rho_d} \quad \text{Équation 9}$$

Avec :

ε : porosité accessible à l'eau (en%)

ρ : Masse volumique apparente de l'échantillon sec (g/cm³)

$M_{sat.eau}$: masse de l'échantillon saturé dans l'eau (g)

$M_{sat.air}$: masse de l'échantillon saturé dans l'air (g)

M_{sec} : masse de l'échantillon séché à l'étuve

Masse volumique

La masse volumique des BTC est généralement comprise entre 1500 et 2000 kg/m³. Elle est liée au type de compactage et à la force de compaction appliquée lors de la production ainsi qu'aux caractéristiques des matériaux utilisés et à leur teneur en humidité lors de la presse. Elle est le rapport entre le poids et le volume du bloc. Connaissant le volume des blocs, elle se détermine par simple pesée de ces dernières à l'aide d'une balance, en utilisant la formule suivante :

$$\varphi = \frac{M}{V} \quad \text{Équation 10}$$

Avec : M = Masse de l'éprouvette en kg ; V = Volume de l'éprouvette en m³

➤ Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau

Elle influence fortement la résistance et à la durabilité des BTC. Cette propriété d'absorption et de désorption est très importante pour ce qui est du confort intérieur de la construction car elle permet une régulation hygrothermique qui conserve un taux d'humidité relativement stable à l'intérieur. Le taux d'absorption d'eau ne doit pas être trop élevé pour éviter tout gonflement de la fraction argileuse ou toute perte de cohésion du BTC. L'ajout de stabilisant permet de réduire l'absorption de façon significative tout en maintenant l'absorption totale largement inférieure à la valeur maximale de 15% recommandée pour les BTC. La chaux est tout de même moins efficace que les autres stabilisants en termes d'absorption. La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %. Le matériau est partiellement immergé sur une hauteur de 5mm. On doit faire en sorte que le débit soit toujours constant de sorte que le bloc soit toujours immergé à la même hauteur. Cette valeur est plus représentative du comportement des BTC soumis à un violent orage que sa capacité d'absorption mesurée à la saturation.

Pour commencer l'essai il faut que les échantillons soit desséchés jusqu'à masse constante, la masse est considérée constante lorsque deux pesées successives effectuées à 24 h d'intervalle font apparaître une diminution de masse < 0,1 % de la masse initiale, puis laisser les blocs se refroidir dans le laboratoire pendant quelques heures puis les peser, soit : P0 (en grammes).

L'immersion a été réalisée en nous servant d'une planche et de certaines cales dans le fond d'un bac rempli d'eau. La hauteur de 5mm a été maintenue à l'aide d'un tuyau dont nous avons conservé le débit constant. Après 10 min, il faut donc retirer chaque bloc de l'eau et l'essuyer avec un linge humide. Pour la capacité d'absorption d'eau, l'échantillon est submergé entièrement dans l'eau pendant 24 h afin d'obtenir la masse d'eau contenue dans l'échantillon total. Le coefficient d'absorption d'eau capillaire de chacun des blocs est donné par la formule suivante :

$$C_{ab} = \frac{(M_w - M_d)}{S\sqrt{t}} \quad \text{Équation 11}$$

$$m(t) = C_{ab}\sqrt{t} \quad \text{Équation 12}$$

Avec :

C_{ab} : Absorption capillaire en g/cm²

(M_w-M_d) : Masse d'eau absorbée par le bloc en g

S : Surface spécifique immergée en cm²

t : temps d'immersion du bloc en min

➤ Absorption totale ou teneur en eau à saturation libre

L'absorption capillaire permet de mettre en évidence le coefficient d'absorption mais n'indique pas la quantité d'eau que le matériau peut stocker. Pour la connaître on détermine la teneur en eau à la saturation libre en immergeant l'échantillon dans l'eau jusqu'à masse constante. Des échantillons d'enduits, préalablement séchés en étuve à 40 °C, sont immergés entièrement dans l'eau jusqu'à masse constante. Le mode opératoire est le même que pour l'absorption capillaire sauf que les blocs sont plongés entièrement dans l'eau.

La teneur en eau en saturation libre est obtenue par la formule suivante :

$$W_{\%} = 100 \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \quad \text{Équation 13}$$

Avec :

M_2 : Masse de l'échantillon ayant absorbé de l'eau en kg

$W_{\%}$: Absorption d'eau en %

M_1 : Masse initiale de l'échantillon en kg

2.2.5.2 Propriétés mécaniques

➤ Essai de compression sèche et humide

La résistance est étroitement liée au type de terre utilisée et à la teneur en stabilisant ajoutée, aux dimensions du bloc ainsi qu'à la procédure de compaction employée. La presse mécanique du laboratoire Eco-Matériau et Habitat Durable du 2iE a été utilisée pour notre essai. La seule différence entre la compression humide et la compression sèche est que la compression humide est faite après immersion des échantillons de blocs dans l'eau pendant 2 heures de temps. Il faut poser les échantillons de BTC entre les deux plateaux de la presse. On lui applique une charge de manière continue avec une vitesse de 0,05 mm/s jusqu'à la rupture. La valeur de la charge maximale de rupture est directement lue en KN à partir d'un logiciel installé sur l'ordinateur connecté à la presse. On obtient la résistance à la compression par la formule suivante :

$$R_c = 10 \frac{F}{S} \quad \text{Équation 14}$$

F = la charge de rupture en KN

S = la surface de compression de l'éprouvette en cm²

R_c = Résistance à la compression en MPa

➤ **Essai de traction**

Il s'agit de soumettre le bloc à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit par une contrainte de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes. On applique la charge d'une manière continue, à une vitesse régulière de 0,002 mm/s jusqu'à la rupture de l'échantillon en deux parties

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

$$R_t = \frac{18F}{\pi * l * e} \quad \text{Équation 15}$$

Avec

R_t: résistance à la traction des blocs en mégapascal (MPa)

F: charge maximale supportée par les deux demi-blocs en kilonewtons (kN)

l: largeur du bloc en centimètres (cm)

e: épaisseur du bloc en centimètres (cm).

2.2.5.3 Propriétés thermiques

➤ **La conductivité thermique**

Elle caractérise la facilité avec laquelle la chaleur entre dans le matériau. Elle est toujours positive et Elle correspond à la densité du flux thermique traversant, en régime stationnaire, un corps homogène soumis à un gradient de température de 1 Kelvin (ou 1°C) par mètre. Elle s'exprime dans le système international par W.m⁻¹.°C⁻¹ ; ou W.m⁻¹.K⁻¹. Ou par J.m⁻¹.K⁻¹.s⁻¹. La conductivité dépend essentiellement de : la nature du matériau, et la température.

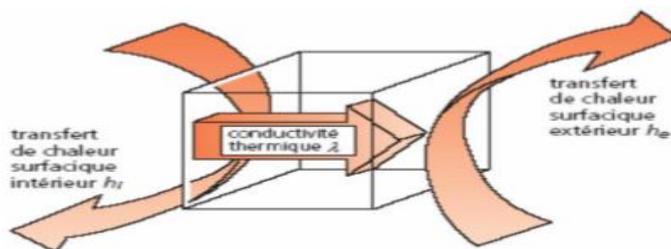


Figure 2-2: Conductivité thermique

➤ **L'effusivité thermique**

Caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus elle est grande et plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur. Elle se caractérise par sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

La mesure de l'effusivité thermique (E) est effectuée sur des échantillons de taille (6x4x3 cm³). Ces dimensions permettent de recouvrir complètement la cellule de mesure et d'éviter que le flux de chaleur ne traverse l'échantillon soumis à l'essai.

➤ La chaleur spécifique ou capacité thermique

La chaleur spécifique (en J/ (kg /K)) est une propriété physique des matériaux et elle dépend généralement de la température. Elle se caractérise par sa capacité à emmagasiner de la chaleur. La chaleur spécifique d'une substance est fonction de sa structure moléculaire et de sa phase. La mesure de la capacité thermique se fait sur des échantillons de taille (6x4x1 cm³), permettant au flux de chaleur cette fois-ci de traverser l'échantillon de mesure. La conductivité, la chaleur spécifique et l'effusivité sont les propriétés thermiques testées sur nos BTC ici au LEMHaD du 2iE grâce au dispositif **DesProTherm** (Dispositif d'Estimation de Propriétés Thermiques). Nos différents paramètres thermiques que sont : la conductivité, la capacité thermique et l'effusivité sont obtenues par les formules suivantes.

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho \times c_p} \quad \text{Équation 16}$$

$$D = \frac{\lambda}{\rho \times c_p} \quad \text{Équation 17}$$

Avec :

E : effusivité thermique (J/m². K.s^{1/2})

C_p : capacité massique thermique (J/m³.K)

λ : conductivité thermique (W/m.K)

D : diffusivité thermique (m²/s)

ρ : densité apparente

Tableau VIII : Conductivité de quelques matériaux

Matériaux	Conductivité (W/m.K)
Ciment portland	0,29
Caoutchouc	0,16
Brique plein	1,16
Polystyrène	0,21
Sol	1,50

Chapitre 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Suivant la méthodologie énoncée au chapitre précédent nous vous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais réalisés, leurs analyses et interprétations.

3.1 Résultats d'essais d'identification de la terre et du CCR

3.1.1 Limites d'Atterberg

Les résultats de quelques essais sur la terre sont consignés dans le tableau 10

Tableau IX: Résultats des essais sur la terre de Kamboinsin

ESSAIS		RESULTATS
Poids Spécifique		2,75
Limites d'Atterberg	Limite de Liquidité %	55,2
	Limite de Plasticité %	24,8
	Indice de Plasticité %	30,4
	Indice de consistance	1,7
Teneur en eau en %		17

L'indice de plasticité étant de 30,4% et la limite de liquidité étant de 55,2 %. Selon la classification USCS, ce matériau peut être classé dans la catégorie At (Argile très plastiques), ce qui justifie le choix de la chaux pour notre fabrication.

3.1.2 Distribution granulaires

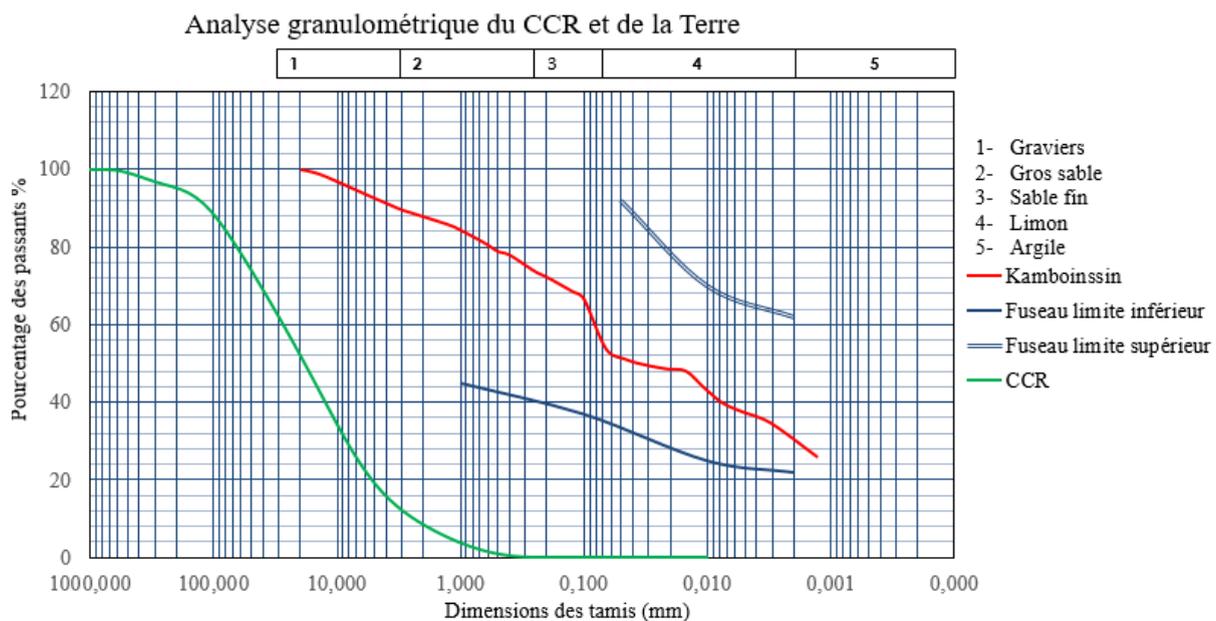


Figure 3-1: Granulométrie de la terre et du CCR

On déduit à partir de la courbe (figure 3-1) que notre terre contient 11% de graviers, 56 % de sables et limons et 33% d'argile. En ce qui concerne sa granulométrie, la terre de Kamboinsin semble parfaitement adaptée à la production des BTC. En effet, comme le montre la figure 3-1, la courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie est parfaitement incluse dans le fuseau de CRATerre pour une stabilisation au carbure de calcium résiduel.

Pour le carbure de calcium résiduel, on remarque que près de 90% des particules sont plus petites que 125 μm .

3.1.3 Composition chimique et minéralogiques

3.1.3.1 Composition minéralogique

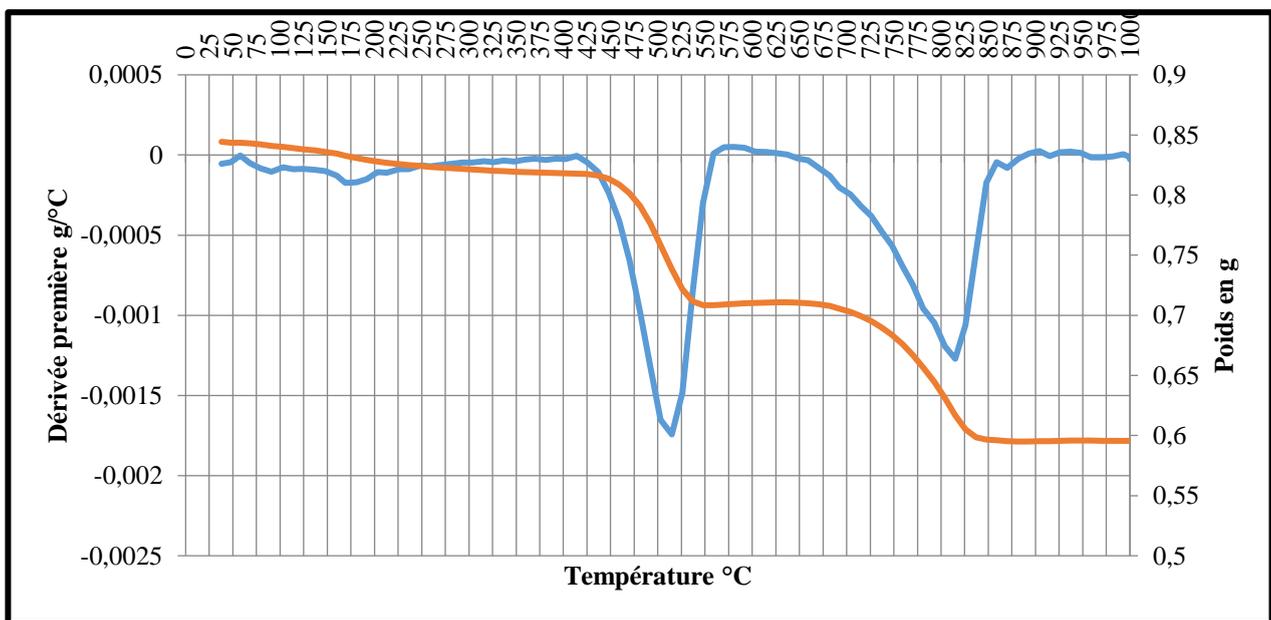


Figure 3-2: Thermogramme du CCR

On remarque deux pertes de masse importantes, une première entre (415-550 C) et la seconde entre (650-850°C), ce qui traduit la déshydratation de la portlandite (l'élément, important dans la réaction du carbure de calcium avec les sols argileux) et la décomposition de la calcite.

L'équation de la réaction entre la chaux vive avec l'eau : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2$

Présentation des masses molaires des différents composants :

$$M(\text{Ca(OH)}_2) = 40.1 + (2 \cdot 16) + (2 \cdot 1) = 74,1 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{CaO}) = 40.1 + 16 = 56.1 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 16 + (2 \cdot 1) = 18 \text{ g/mol}$$

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

On remarque que le H₂O correspond à 24,29% de la quantité de portlandite et à partir de la figure 3-2, on estime la perte de masse à 12,9%. Le taux de portlandite dans notre CCR est donc d'environ 53,10%, après le calcul suivant : $\%Ca(OH)_2 = \frac{100 \times 12,9}{24,2}$

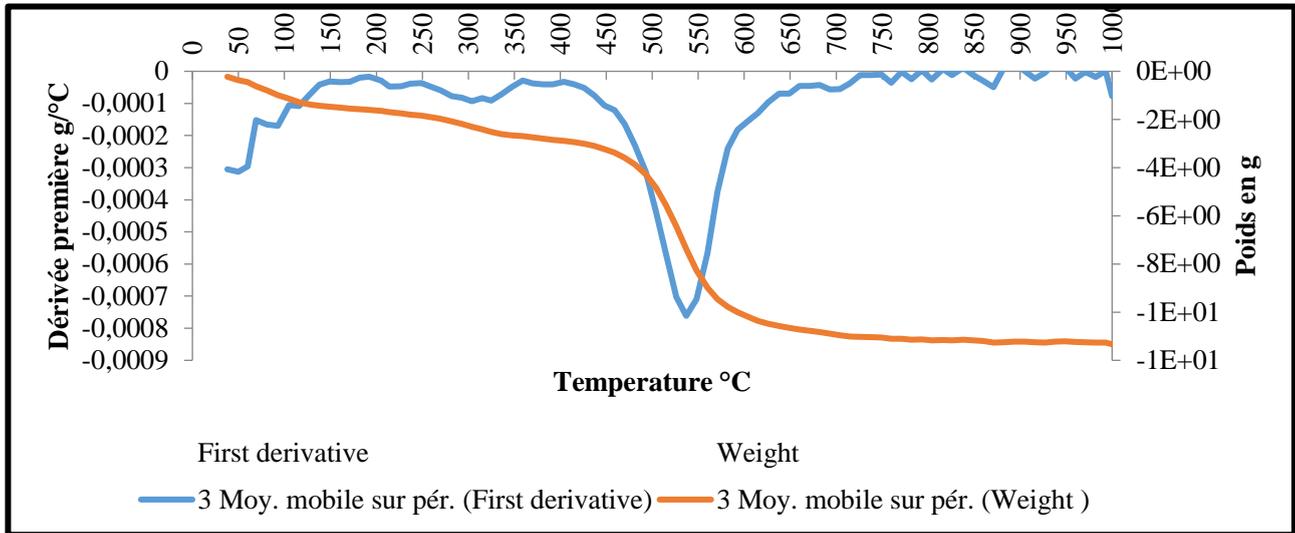


Figure 3-3: Thermogramme de la terre

Pour la terre la plus grande perte de masse est précisée par le spectrogramme de masse et a eu lieu entre 460 et 640°C (Figure 3-3). Ce qui correspond à la déshydratation et à la déshydroxylation de la kaolinite et de la goethite



Présentation des masses molaires des différents composants :

$$M(Al_2Si_2O_5(OH)_4) = 2 \times 27 + 2 \times 28 + 4 \times 1 + 9 \times 16 = 258 \text{ g/mol}$$

$$M(Al_2O_3) = 2 \times 27 + 3 \times 16 = 102 \text{ g/mol}$$

$$M(SiO_2) = 28 + 2 \times 16 = 60 \text{ g/mol}$$

$$M(H_2O) = 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ g/mol}$$

On remarque que le H₂O correspond à 13,95% de la quantité de kaolinite. A partir de la figure 3-3, on remarque une perte de masse de près 10,94% de pour la même plage de température. En faisant le produit des extrêmes et le produit des moyens : $Al_2Si_2O_5(OH)_4 = \frac{100 \times 10,94}{13,95}$, on obtient le taux de kaolinite dans la terre de Kamboinsin qui est de 78,42%. Ce qui rejoint approximativement les proportions en annexe 3

3.1.3.2 Composition chimique

Tableau X: Composition chimique de la terre de Kamboinsin

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	MgO	NaO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
Kamboinsin	51,0	24,0	12,7	0,2	0,9	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	10,1	99,4

Tableau XI: Composition chimique du CCR

Oxides	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	MgO	NaO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
CCR (C125µm)	4,8	1,7	0,7	67,4	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	26,7	101,7

Nous remarquons au tableau X, que notre terre de Kamboinsin a une proportion assez élevée en silice >50% et une proportion en Al₂O₃ avoisinant les 25%. La silice permet la réaction avec la chaux en milieu basique pour donner des silicates de calcium hydratés. Ce taux élevé de Fe₂O₃ est responsable de la couleur rouge qu'a notre argile.

Pour notre carbure de calcium résiduel, au tableau XI, on note une prédominance de CaO de 67,4% et une perte au feu de près de 27%.

3.2 Résultats des essais sur les BTC

3.2.1 Propriétés physiques

3.2.1.1 Porosité et densité apparente

Il existe un lien étroit entre la structure porale, l'état hydrique du matériau et les transferts hygrothermiques. Il est donc indispensable de caractériser les matériaux étudiés sur le plan architectural, notamment de déterminer la porosité.

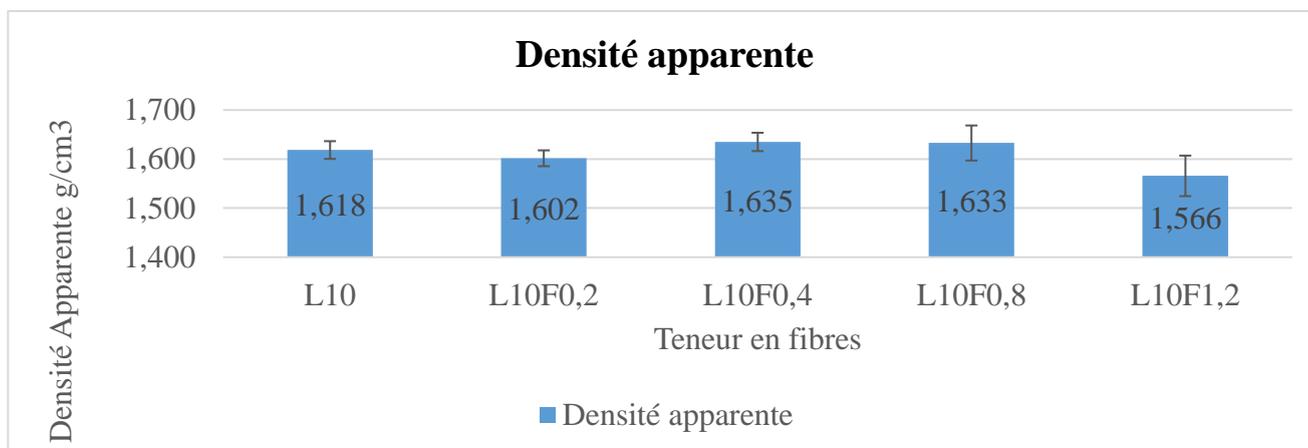


Figure 3-4: Densité Apparente des BTC contenant 10% de CCR

On remarque sur la figure 3-4, une augmentation de la densité apparente avec l'introduction des fibres à 0,4 % par rapport aux BTC sans fibres (1,630 -1,602 g/cm³) qui tend à se stabiliser à 0,8 % que et rechute à 1,2 % et atteint une valeur de 1,566 g/cm³. Cela montre que la masse volumique est fonction du dosage en fibres ; car les fibres créent des pores ouverts accessibles à l'eau. En effet on note une augmentation des pores avec l'augmentation des teneurs en fibres. En tenant compte de l'écart-type on peut en déduire, que la variation n'est pas vraiment significative entre (0-0,8%) de teneur en fibres donc les BTC conservent une même densité entre ces teneurs en fibres.

Pour la porosité totale figure 3-5, on remarque qu'elle évolue entre (0,2 et 0,4% de fibres). Au lieu de croître elle commence à baisser à 0,4 % de fibres et augmente à nouveau à partir de 0,8 % de fibres. Cela traduit qu'il y'a une quantité plus importante de pores accessible à l'eau avec 0,2% de fibres qu'avec 0,4 et 0.8% de fibres. Notre hypothèse se vérifie par la suite avec l'ajout des fibres à 1,2% dans nos BTC, qui ont une porosité supérieure à tous les autres dosages.

La porosité accessible à l'eau quant à elle augmente et passe de 31,52 à 35 % avec l'introduction des fibres (0-1,2%) car l'incorporation des fibres crée des pores ouverts accessibles à l'eau. Ceci traduit une augmentation de la présence des pores de près de 3,48% par rapport aux BTC sans fibres.

Les porosités à 1,2% sont les plus grandes cela est expliqué par la relation entre la porosité et la densité, plus la densité est grande moins est la porosité.

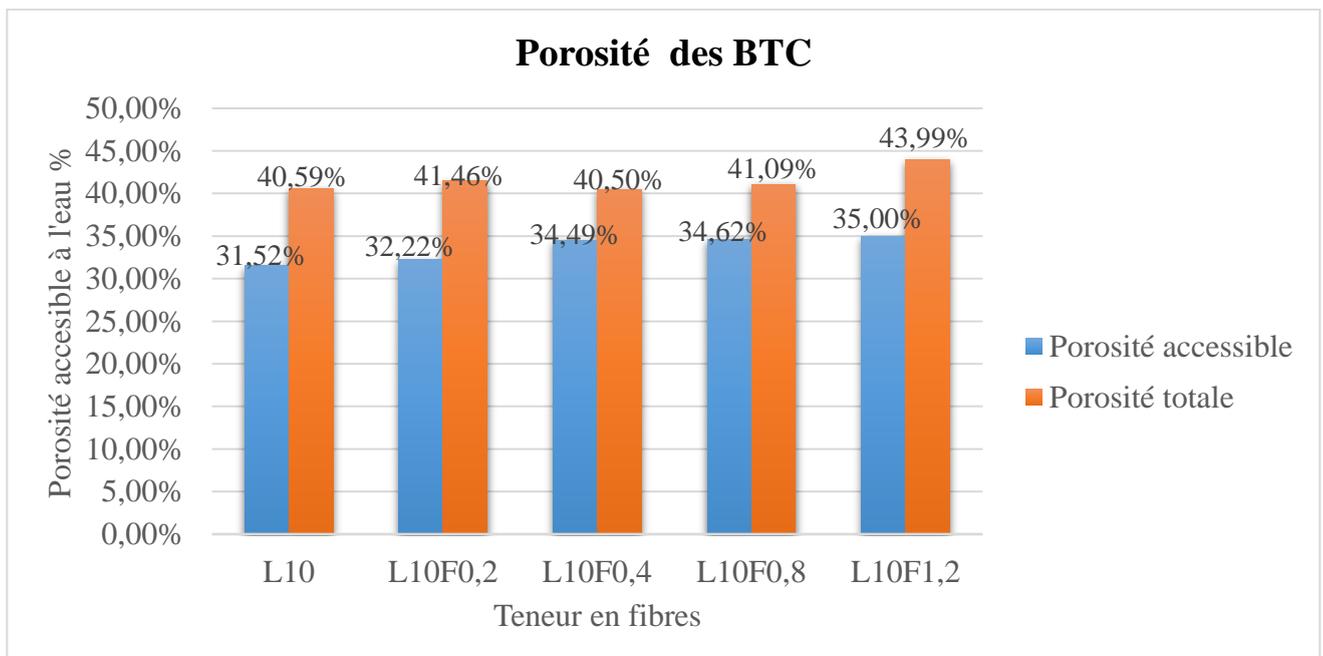


Figure 3-5: Porosité accessible à l'eau et Porosité totale des BTC contenant 10% de CCR

3.2.1.2 Absorption capillaire

Les tests d'absorption capillaire sont des approximations raisonnables de ce qui se passe dans la réalité. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3-6

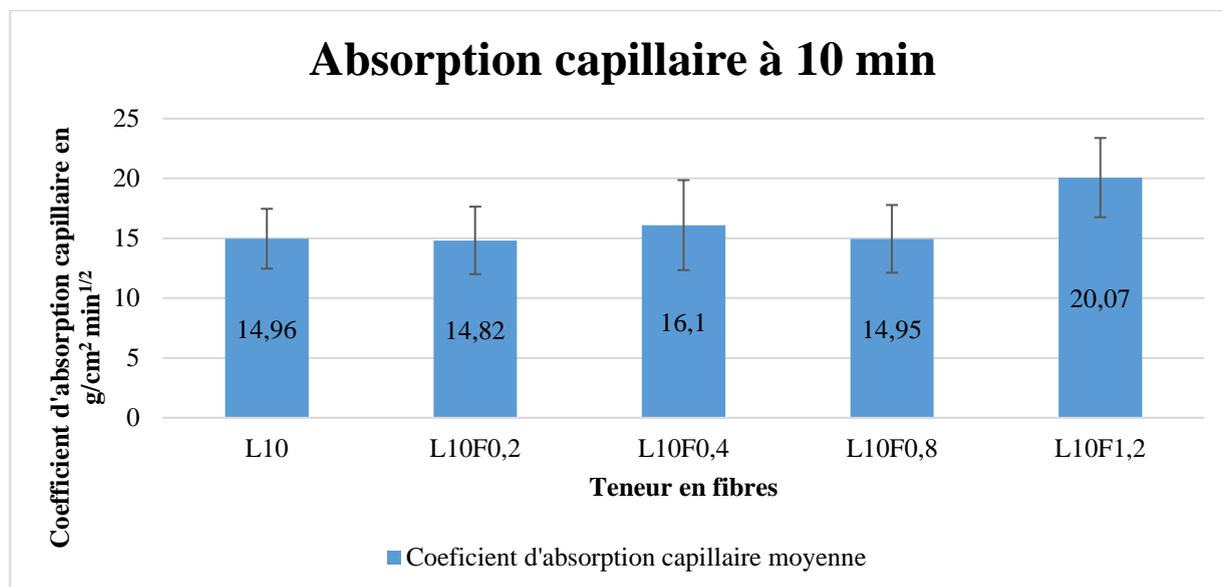


Figure 3-6: Absorption capillaire à 10 min des BTC contenant 10% de CCR

Nous remarquons que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité augmente en fonction du dosage en fibres. Ces comportements illustrent le comportement hydrophile des fibres. Nous pouvons expliquer cela par l'existence de nombreux pores, car le volume des vides est lié à la quantité d'eau que le bloc peut absorber. L'annexe 7 présente les coefficients d'absorption par capillarité en fonction de la racine carrée du temps en heures. En ce qui concerne l'évolution de la sorptivité, on remarque qu'elle est plus grande pour les BTC non fibrés, avec une variation allant de (6,544-5,605 Kg/m²), ce qui voudrait dire que nos BTC fibrés ont des pores de dimensions moins grandes

3.2.1.3 Absorption totale

L'absorption totale d'eau d'un bloc renseigne sur la porosité ouverte, ce qui confère à ce paramètre un caractère très important pour les BTC. En effet moins est l'absorption d'eau d'un bloc, mieux il conservera ses performances mécaniques en milieu humide. L'absorption totale d'eau après un jour d'immersion augmente quand la teneur en fibres augmente. Nos BTC fibrés en 24 h ont absorbé en général près de 20% d'eau (Annexe 6). Pour chacune des formulations, la vitesse d'absorption est forte durant les 8 premières heures puis un palier s'établit plus lentement de (8-24h).

3.2.2 Propriétés mécaniques

3.2.2.1 Résistance à la compression sèche

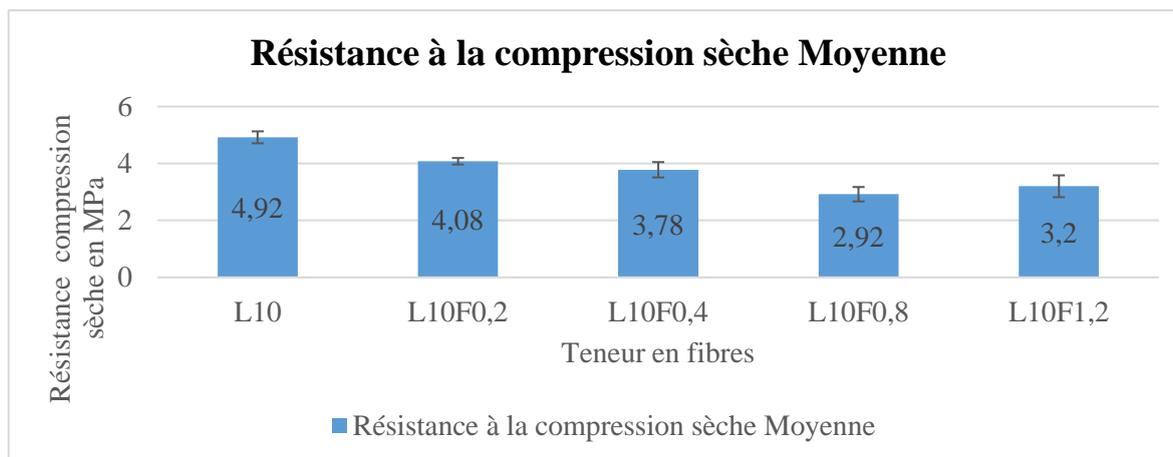


Figure 3-7: Résistance à la compression sèche des BTC contenant 10% de CCR

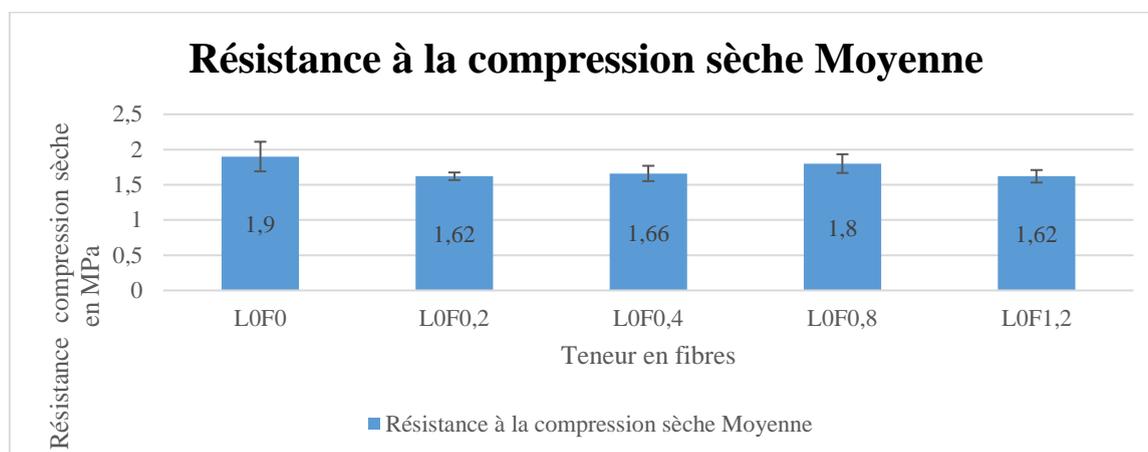


Figure 3-8: Résistance à la compression sèche des BTC sans CCR

Les figures 3-7 et 3-8 donnent les résultats obtenus en compression sèche de nos BTC après les différentes formulations. Les résultats de la compression des BTC à 45 jours ont confirmé que le carbure de calcium résiduel est un bon stabilisant. On remarque que le carbure de calcium résiduel apporte près de 50 % d'amélioration en résistance aux BTC auxquelles on a incorporé les fibres, si on compare les résistances à la compression sèches des BTC avec 10% de CCR et (sans CCR) qui sont respectivement de : 4,92(1,90) 4,08 (1,62) ; 3,78 (1,66) ; 2,92 (1,8) ; 3,2 (1,62) pour les teneurs en fibres allant de (0 à 1,2%). Nous remarquons aussi une baisse de résistance au fur et à mesure qu'on augmente le dosage en fibres à partir de 0,2%, en ce qui concerne les BTC fibrés avec 10% de CCR. Cela rejoint les résultats de C.K Subramania Prasad(2012). Cette baisse est de près de 17% par rapport à la résistance des BTC sans fibres qui est de 4,92MPa. On remarque cependant que l'ajout de fibres n'est pas une condition nécessaire à l'amélioration de la résistance mécanique

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

sèche. Pour les BTC fibrés sans CCR, nous observons une baisse de la résistance en compression entre (0-4%) allant de 1,9 à 1,66 puis une augmentation à 0,8% de 1,8 MPa qui se voit donc être l'optimum pour les BTC fibrés sans CCR, suivi d'une baisse de la résistance en compression sèche à 1,2%.

- Pour les blocs avec CCR elle pourrait s'expliquer par l'augmentation des vides dues aux fibres.
- Pour les blocs sans CCR la raison pourrait être la séparation de la terre lors de la compression ce qui laisserait des vides qui créeraient des faiblesses. Ceci implique que les déformations ne seront plus transmises correctement, ce qui diminuerait la résistance de la terre.

Nous pouvons conclure que la baisse de résistance à la compression des BTC est fonction de son dosage en fibres. Du point de vue du comportement mécanique les BTC avec 10% de chaux ont donné la meilleure résistance à la compression sèche. Dans les formulations des BTC avec 0,2% de plastiques on obtient une baisse de la résistance mécanique

3.2.2.2 Résistance à la compression humide

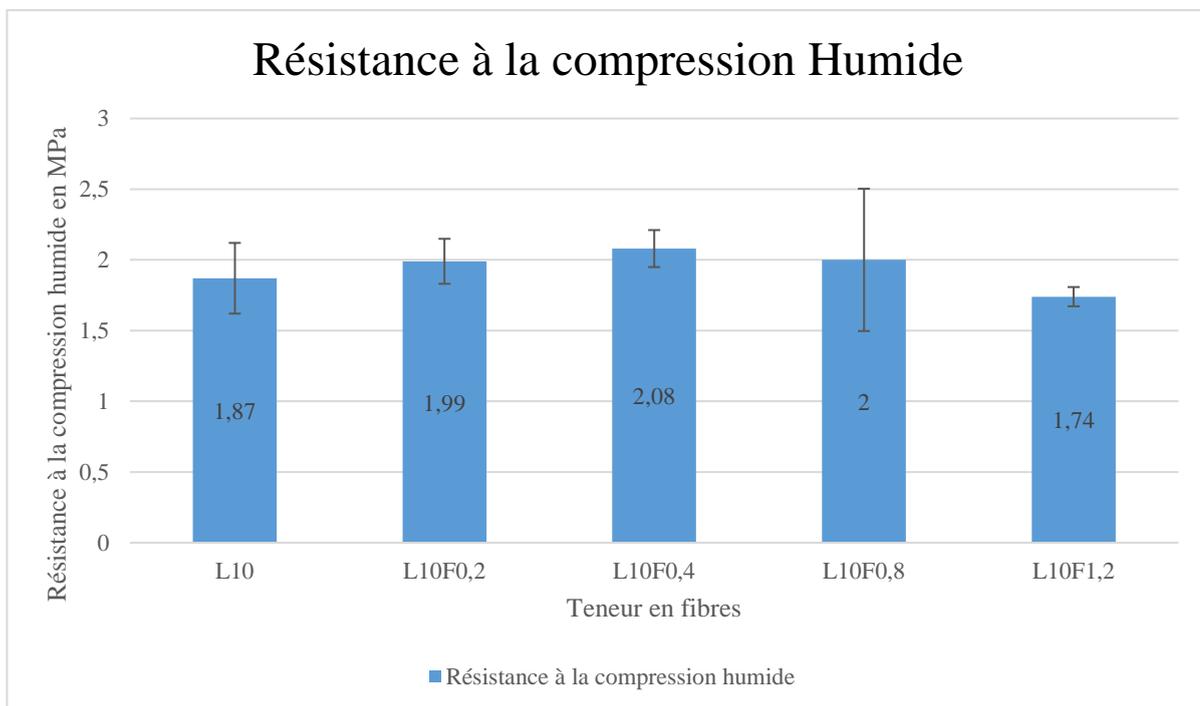


Figure 3-9: Résistance à la compression humide des BTC contenant 10% de CCR

Nous remarquons à partir de la figure 3-9 que les résistances moyennes à la compression humide que sont respectivement pour les teneurs en fibres allant de 0,2% à 1,2% : (1,99 ; 2,08 ; 2 ; 1,74) MPa sont toutes au moins égales à la moitié des résistances à leurs compressions sèches

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

correspondantes, que sont : (4,08 ; 3,78 ; 2,92 ; 3,2) MPa. Ceci illustre surtout le caractère hydrophile des fibres. L'interface fibre-matrice se gonfle en se gorgeant d'eau et la matrice perd de sa rigidité. On note aussi sur la figure 3-9, une baisse considérable de la résistance des BTC sans fibres ayant été immergées dans l'eau pendant 2h, qui passe de 4,92 à 1,87 MPa. On peut en déduire que les BTC contenant des fibres se comportent mieux que les BTC sans fibres en condition humide.

La résistance diminue en fonction de la quantité d'eau absorbée. On constate que pour tous nos BTC, la plus basse résistance à la compression humide que l'on puisse obtenir avoisine les 2 MPa > à 1,2 MPa. C'est la valeur minimale recommandée par (Houben H, Guillaud H, 1994). Les BTC sont donc classés comme étant des BTC 40 (BTC ayant une résistance humide minimale de 2MPa).

NB : A noter que la compression humide des échantillons non stabilisés n'a pas pu être évaluée compte tenu de leur désagrégation totale pendant la phase d'imbibition.

3.2.2.3 Résistance en traction

Malgré que nos BTC dans le bâtiment ne soient pas vraiment sollicités en flexion, nous avons soumis 1 échantillon de chaque formulation à l'essai de traction indirect, juste pour voir comment elles se comportent.

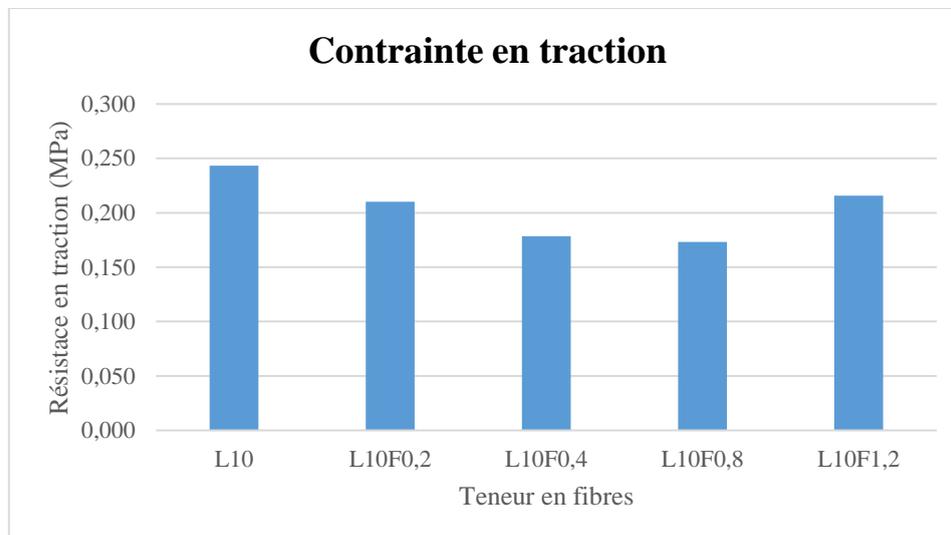


Figure 3-10: Résistances en traction des BTC contenant 10% de CCR

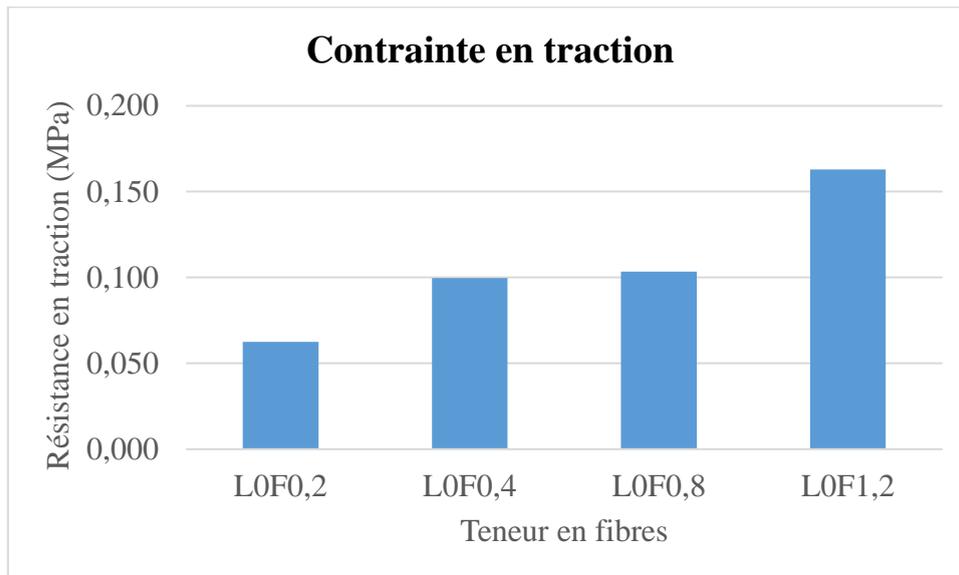


Figure 3-11: Résistances en traction des BTC sans CCR

Pour nos BTC fibrés avec 10% de chaux sur la figure 3-10, nous remarquons que les valeurs à l'essai de traction des BTC fibrés sont toutes inférieures à celles des BTC sans fibres avec 10% de chaux. Nous pouvons expliquer cela par la non adhérence entre les fibres et la matrice des BTC. Une augmentation de la résistance en traction des BTC à 0.2% de fibres et à 1.2 % de fibres avec 10% de chaux est à noter par rapport à celles des BTC à 0,4 et 0,8 % de fibres à 10% de chaux. On peut expliquer cela par le manque d'homogénéité (la mauvaise dispersion des fibres dans le mélange).

Pour les BTC fibrés sans chaux sur la figure 3-11, on remarque une augmentation de la résistance à la traction avec l'ajout des fibres. Ceci rejoint les résultats d'Eko et al (2012) qui ont remarqué que la résistance à la traction croît avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une valeur optimale au-delà de laquelle la résistance diminue quand la teneur en fibres est accrue.

3.2.3 Propriétés thermiques

Outre les résistances mécaniques, les performances thermiques des BTC sont importantes pour le confort intérieur de la construction. On évalue ici la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique.

3.2.3.1 Conductivité thermique

Regardons tout d'abord la conductivité thermique donnée en W/m.K. L'objectif est la plus faible conductivité pour avoir une meilleure isolation thermique du matériau.

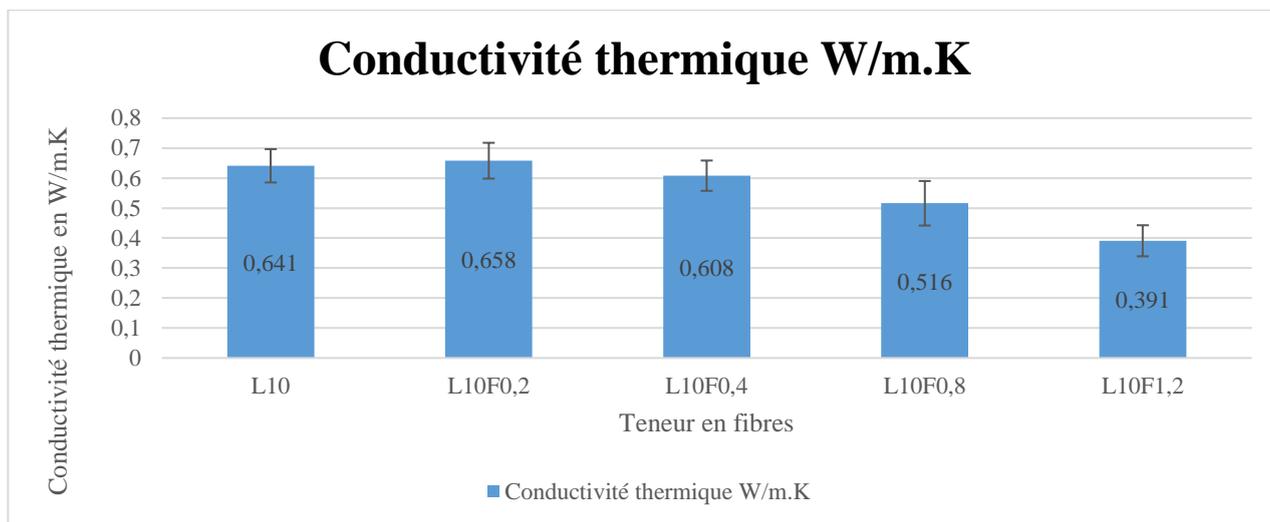


Figure 3-12: Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR

On remarque que la conductivité thermique décroît avec l'augmentation du dosage en fibres. Entre 0% de fibres et 0,2%, on ne remarque pas trop la variation des différents paramètres. Mais à partir de 0,4% on remarque que la conductivité thermique passe de 0,608 à 0,391 W/m.K, soit une baisse de 7,5% entre (0,2 à 0,4% de fibres) et 35,69% entre (0,4 à 1,2% de fibres) (Figure 3-12). La présence des fibres très peu conductrices de chaleur permettent de diminuer la conductivité thermique ce d'autant qu'elles sont longues et leur teneur est élevée. Du point de vue du comportement thermique la meilleure formulation est celle de 1,2% qui correspond à la diminution de la conductivité de 35,69% (0,391 W/m.K). Le résultat à 0,8% est plus approprié dans la mesure où, d'après Doat et al. (1979), le coefficient de conductivité thermique doit être située entre: 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C, soit 0,512-0,66 W/m.K. En comparaison. Elle présente même de meilleurs résultats par rapport à un BTC stabilisé au CCR (1 W/mK) et celle d'un BTC stabilisé au ciment est d'environ (1,2 W/mK). Cette baisse de la conductivité thermique peut être due à la présence des fibres qui ont créé des vides donc présence de pores, ce qui confirme que nos fibres polymériques ont une bonne conductivité thermique. Cela vérifie l'affirmation de (Rahman & Riza, 2015 ; Sore, 2013 ; Taallah, 2014 ; Courard, 2012 ; Energie+) qui dit, qu'on observe une diminution de la conductivité thermique pouvant aller jusqu'à 50% avec l'augmentation de la teneur en fibres.

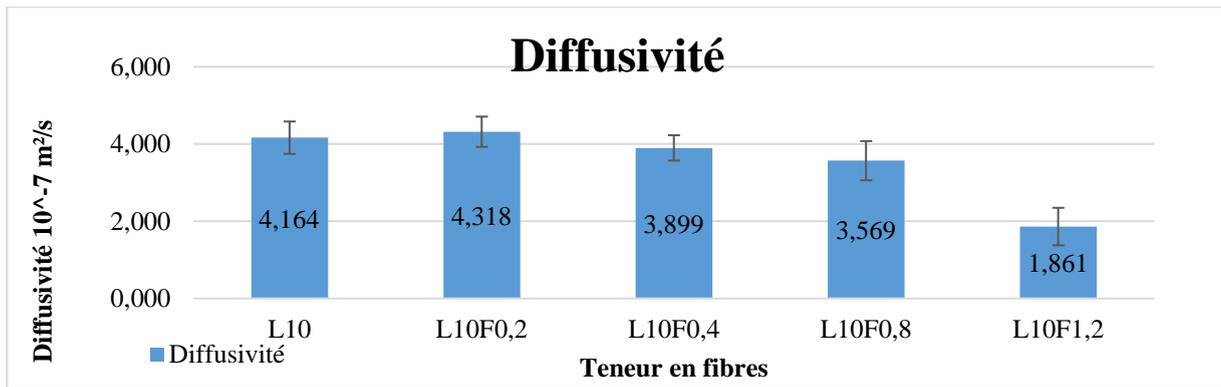


Figure 3-13: Variation de la diffusivité en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR

On remarque sur la figure 3-13 que, pour nos BTC fibrés la diffusivité baisse de 4,318 -1,861 $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ de 0,2% de fibres à 1,2% de fibres. La diffusivité diminue donc en fonction de l'augmentation du pourcentage en fibres. Par conséquent plus nos BTC contiennent des fibres, ils permettent moins rapidement la transmission de la chaleur. Ce résultat est important dans la mesure où nos BTC fibrés ont une faible conductivité thermique mais aussi permettent de retarder la transmission de la chaleur.

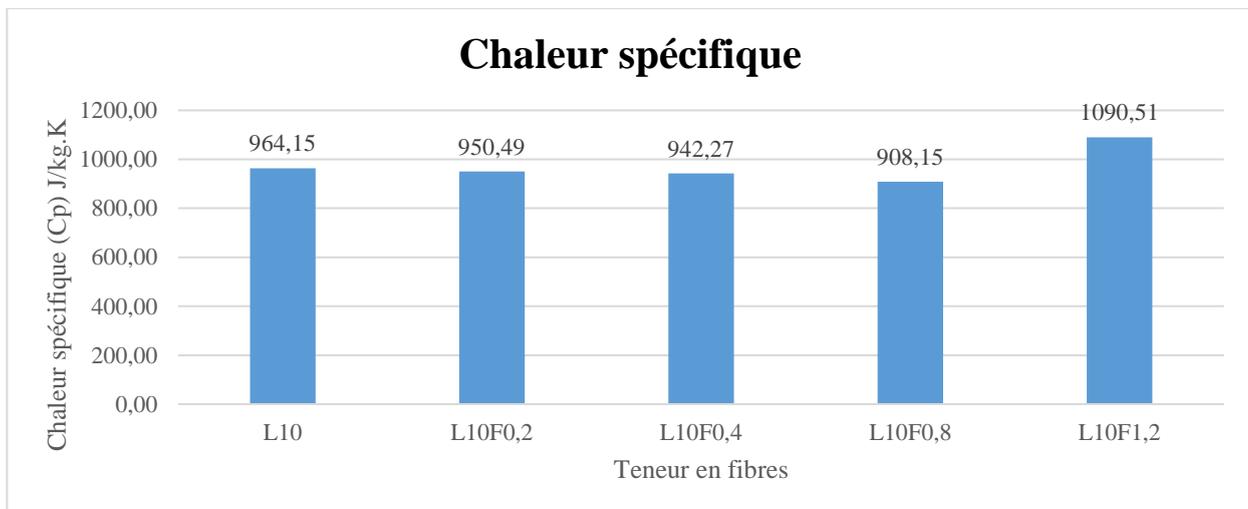


Figure 3-14: Variation de la chaleur spécifique en fonction du dosage en fibres des BTC contenant 10% de CCR

On remarque sur la figure 3-14, que la chaleur spécifique diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre. Cela est logique du fait que théoriquement Cp varie dans le même sens que λ . Ce que l'on constate aussi est qu'après avoir dépassé 0,8 % de fibres, la chaleur spécifique croît jusqu'à atteindre 1090,51 J/kg.K à 1,2 % de fibres.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une thématique de développement durable à travers l'écoconstruction. Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à l'amélioration des performances des BTC, en utilisant les matériaux locaux : la terre et les fibres polymériques. Pour réduire la sensibilité à l'eau de nos BTC, nous avons utilisé un liant. Les différents essais réalisés sur notre terre montrent que notre échantillon provenant de Kamboinsin est une argile plastique riche en silice et que les minéraux majoritaires sont la kaolinite et le quartz. Le carbure de calcium résiduel étant conseillé pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des argiles, notre choix s'est porté sur son utilisation en tant que stabilisant. Nous avons ensuite procédé à l'élaboration des différentes formulations et à la confection de nos BTC. Afin d'optimiser l'utilisation de ce différents matériaux, une étude a été menée et nous avons obtenu les résultats suivants :

- une baisse de la résistance à la compression sèche de près de 17% suite à l'ajout des fibres polymériques à 0,2 % (4,08 MPa) par rapport aux BTC témoins de 4,92 MPa (0% de fibres)
- une augmentation de l'absorption totale d'eau des blocs avec l'incorporation des fibres
- une meilleure résistance mécanique sèche avec les blocs stabilisés au CCR et sans fibres
- une plus basse conductivité thermique avec les BTC avec 10% de CCR et 1,2% de fibres (0,391 W/m.K)

Par ailleurs les résultats que nous avons eus après ces travaux sont satisfaisants car ils correspondent aux normes prévues et aux résultats obtenus par d'autres recherches dans le domaine de la construction. D'autres essais de caractérisation n'ont pas pu être menés comme la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau, des courbes d'adsorption/désorption du matériau qui permettraient de mieux connaître les propriétés de transfert et de stockage de l'humidité de ces BTC. Nous recommandons que les futures recherches soient orientées vers:

- l'optimisation du dosage des fibres plastiques pour permettre une bonne résistance mécanique et en même temps une conductivité thermique (évaluer le dosage à 0,6% de fibres) assez basse pour permettre la réduction de l'utilisation de l'énergie pour la production du froid ou sa conservation.
- l'analyse du confort acoustique de nos BTC, à travers la détermination des propriétés acoustiques.
- l'étude de l'influence de l'humidité sur les propriétés thermo-mécaniques des BTC fibrés.

BIBLIOGRAPHIE

1. Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie
2. Boffoue, Coulibaly, Emeruwa, Kouakou & Kouakou (. « "Influence de l'eau et du ciment sur la stabilité et la conductivité thermique des briquettes d'argile ciment". Valorisation des matières premières argileuses pour un développement durable dans les domaines de l'industrie du bâtiment et de l'artisanat : Rapport final (Séminaire sous régional). Ouagadougou, Université de Ouagadougou », 1997.
3. CHAIB, Hachem. « Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville de Ouargla) », 2017.
4. C K Subramania Prasad, E K Kunhanandan Nambiar, Benny Mathews Abraham. « Plastic Fibre Reinforced Soil Blocks as a Sustainable Building Material », s. d.
5. CRATerre. GATE. « Bloc de terre comprimée. Eléments de base ». Eschborn, Allemagne, 1991.
6. DANSOU.A : "Bulletin d'information N°2" (Terre stabilisée, matériau de construction) ; CCL, Avril – Mai – Juin 1975.
7. Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. « Construire en terre », 1979.
8. Ebrima, Colley. « Effects of Polyethylene Terephthalate Fibers in The Water Resistance of Compressed Stabilized Earth », 2014.
9. GATE. « Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks) », 1994.
10. HALLO Yaovi : "Influence des balles de riz sur les caractéristiques mécaniques des blocs de terre stabilisée". Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de Conception, IFTS, Lomé-TOGO, 2012.
11. HOUBEN et GUILLAUD,. « Traité de construction en terre », 1989.
12. Houben H, Guillaud H. « . Earth construction—a comprehensive guide. » London: Intermediate Technology, 1994.
13. l'ESTAQUE Marseille « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic Buzau mai 2010
14. Millogo, Y. « Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées des liants hydrauliques: applications au génie civil (bâtiments et routes), Thèse de Doctorat de l'Université de Ouagadougou. », 2008.
15. Philbert Nshimiyimana , David Miraucourt , Adamah Messan , Luc Courard. « Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash for improving the Compressive Strength of Compressed Earth Blocks », 2018.
16. Rigassi, V., & CRATerre-EAG. « Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production. Eschborn, GTZ. », 1995.
17. Salehan I, Yaacob Z. « Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. », 2011.
18. Seick Omar SORE "Etudes techniques des bct stabilises a la chaux eteinte " Mémoire de fin d'étude Master Génie Civil 2012-201
19. Van Damme, H. « "La terre, un béton d'argile". », janvier 2013.
20. Vergas J, Bariola J, Blondet M. Seismic. « Strength of Adobe masonry. Materials & Structures », 1986.
21. Younoussa Millogo, Jean-Emmanuel Aubert , Erwan Hamard ,† and Jean-Claude Morel. « How Properties of Kenaf Fibers from Burkina Faso Contribute to the Reinforcement of Earth Blocks », 2015.

ANNEXES

Annexe 1:Absorption capillaire des BTC contenant 10% de CCR

Désignation	Absorption %	Absorption Moyenne%	Ecart type	Normes
10% CCR avec 0,2 % fibres	15,03	14,82	0,001002	<20 FAIBLE ABSORPTION
10% CCR avec 0,2 % fibres	11,90			
10% CCR avec 0,2 % fibres	17,52			
10% CCR avec 0,4 % fibres	20,40	16,10	0,002926	
10% CCR avec 0,4 % fibres	13,48			
10% CCR avec 0,4% fibres	14,40			
10% CCR avec 0,8 % fibres	15,85	14,95	0,004359	
10% CCR avec 0,8 % fibres	17,23			
10% CCR avec 0,8 % fibres	11,78			
10% CCR avec 1,2 % fibres	18,75	20,07	0,003214	20-40
10% CCR avec 1,2 % fibres	23,84			
10% CCR avec 1,2 % fibres	17,62			

Annexe 2: Résistances à la compression sèche et humide des BTC

Désignation	Résistance sèche Moyenne (MPa)	Ecart-Type (SI)	Résistance humide Moyenne (MPa)	Ecart-Type (SI)
10% de CCR avec 0,2% fibres	4,08	0,114	1,99	0,250
10% de CCR avec 0,4% fibres	3,78	0,27	2,08	0,159
10% de CCR avec 0,8% fibres	2,92	0,254	2	0,131
10% de CCR avec 1,2% fibres	3,2	0,384	1,74	0,503
Sans CCR 0,2% fibres	1,62	0,054	0	0,068
Sans CCR 0,4% fibres	1,66	0,109	0	
Sans CCR 0,8% fibres	1,8	0,133	0	
Sans CCR 1,2% fibres	1,62	0,089	0	
10% de CCR	4,92	0,21	1,84	

Influence des fibres polymériques sur les performances des blocs en terre comprimés

Les résultats de l'annexe 3 montrent aussi, la présence de l'hématite et de la goéthite, leur densité étant élevée, ces minéraux contribuent au renforcement des propriétés mécaniques de l'argile. De plus, la somme des pourcentages des différents composés est remarquablement voisine de 100%. Les éléments trace représentent moins de 2% de la masse totale.

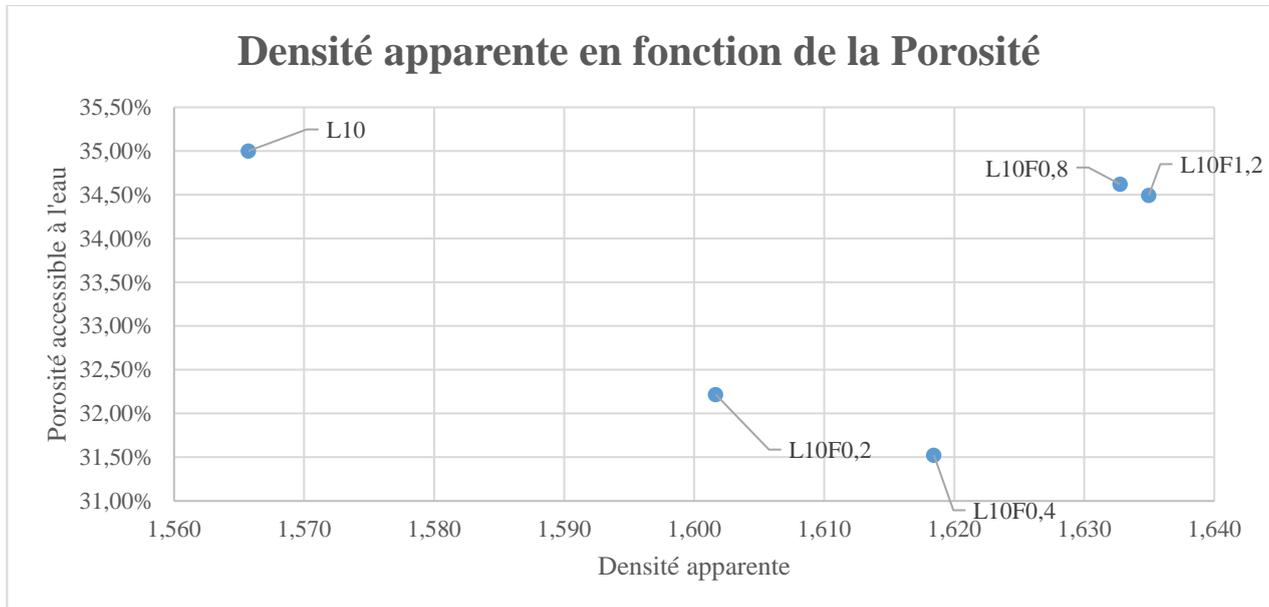
On note pour le carbure de calcium résiduel, des minéraux carbonatés tels que l'aragonite, la calcite et la rapidcreekite respectivement à 20,66% ; 15,87% et 13,31%.

Annexe 3: Analyse minéralogique de la terre de Kamboinsin et du CCR par XRD

Minerals	Proportion. %)
Kaolinite	75,87
Quartz	11,07
Hematite	0,44
Goethite	8,59
Anorthite	1,19
Orthoclase	1,32
Pyroxene-ideal	0,55
Total	99,03

Minerals	Proportion. %)
Portlandite	43,03
Aragonite	20,66
Calcite	15,87
Rapidcreekite	13,31
Kaolinite	4,05
Quartz	2,59
Gypse	0,5
Total	100,01

Annexe 4: Porosité accessible à l'eau en fonction de la densité apparente des BTC avec 10% de CCR

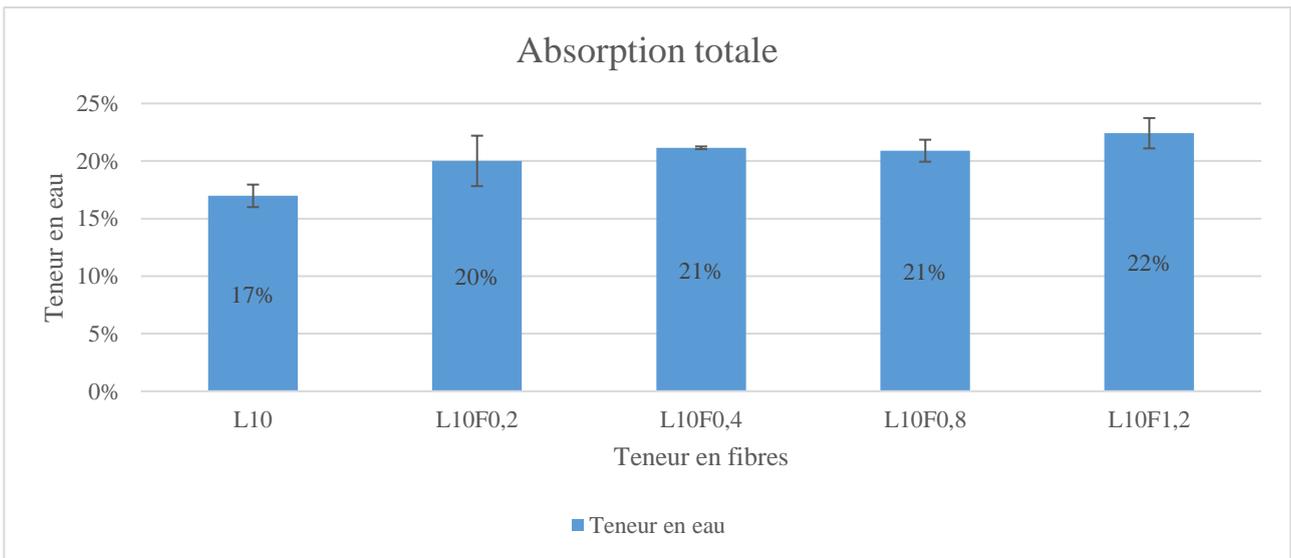


L'annexe 4 montre la relation entre la densité apparente et la porosité accessible à l'eau pour les différentes formulations. D'une manière générale, on remarque que lorsque la densité augmente quand la porosité diminue. La porosité varie ainsi de 31.52% à 35 % alors que la densité varie de 1,566 à 1,635 pour les BTC fibrés. La fragilité des BTC sans liant en contact de l'eau n'a pas permis de quantifier la porosité accessible à l'eau de ces types de BTC.

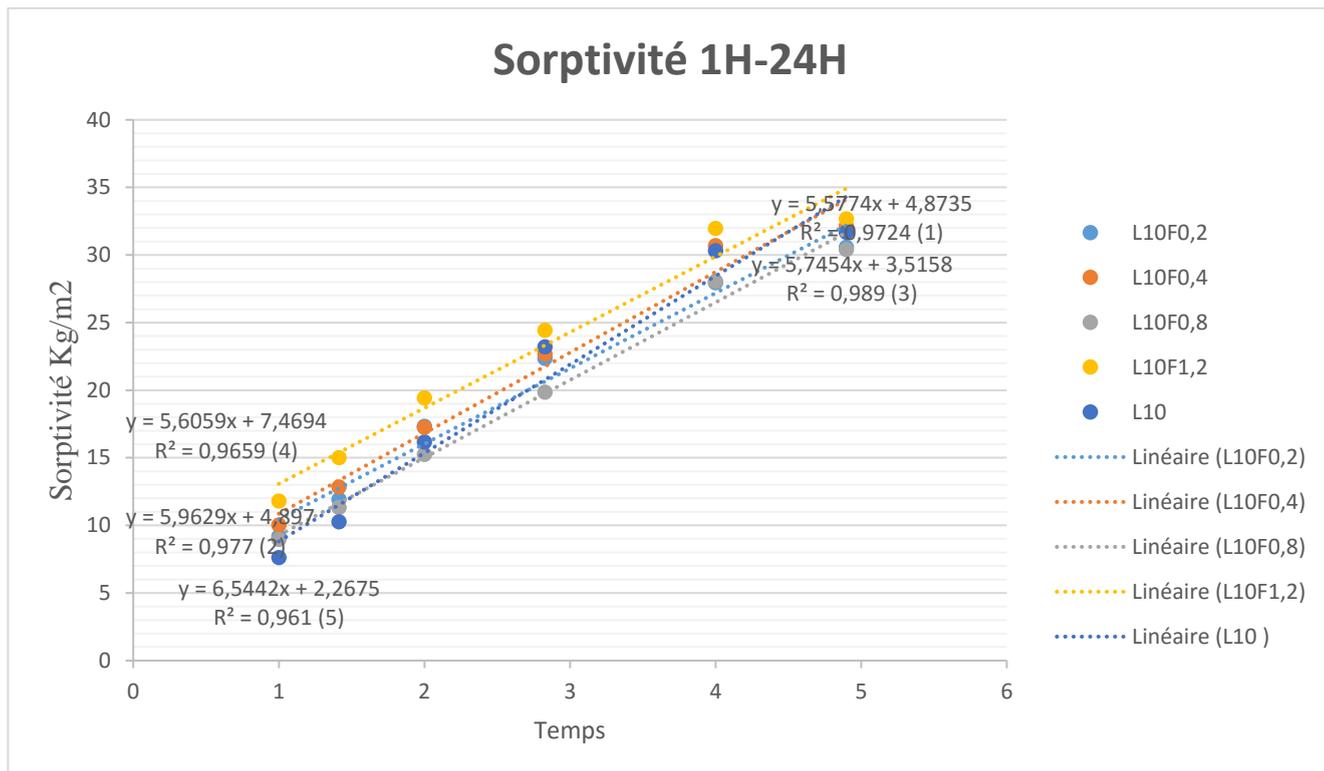
Annexe 5: Conductivité thermique et Diffusivité des BTC avec 10% de chaux

Désignation	Conductivité thermique W/m.K	Diffusivité $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
10% de CCR	0,641	4,164
10% de CCR avec 0,2 % de fibres	0,658	4,318
10% de CCR avec 0,4 % de fibres	0,608	3,899
10% de CCR avec 0,8 % de fibres	0,516	3,569
10% de CCR avec 1,2 % de fibres	0,391	1,861

Annexe 6: Essai d'absorption capillaire et d'absorption totale des BTC avec 10% de CCR



Annexe 7: Propriétés physiques des BTC contenant 10% de CCR



Désignation	Coefficient d'absorption	Coefficient d'absorption Moyen	R2	Moyenne R
L10	6,1638	6,7441	0,984	0,95883333
L10	6,7441		0,9435	
L10	6,7246		0,949	
L10F0,2	5,4902	5,57743333	0,9665	0,96956667
L10F0,2	5,7681		0,9885	
L10F0,2	5,474		0,9537	
L10F0,4	6,1984	5,96293333	0,964	0,97253333
L10F0,4	5,6092		0,9885	
L10F0,4	6,0812		0,9651	
L10F0,8	5,3162	5,7454	0,9818	0,9752
L10F0,8	5,5758		0,9913	
L10F0,8	6,3442		0,9525	
L10F1,2	5,6881	5,60593333	0,961	0,95696667
L10F1,2	5,1608		0,9414	
L10F1,2	5,9689		0,9685	