



PROPRIETES D'USAGE ET DURABILITE DES BRIQUES EN TERRE
COMPRIMEES STABILISEES PAR LES SOUS-PRODUITS AGRO-
INDUSTRIELS : TERRE ARGILEUSE DE KAMBOINSE -BURKINA FASO

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC
GRADE DE MASTER

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE
Option : Routes et Ouvrages d'Art (ROA)

Présenté et soutenu publiquement le 18 Janvier 2020 par

Serge KONON

Directeur de mémoire : **Adamah MESSAN**, Maître de conférences CAMES

Maître de stage : **Philbert NSHIMIYIMANA**, Ingénieur de recherche

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables
(LEMHaD) de 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président de Jury : Dr **Décroly DJOUBISSIÉ**

Membres et correcteurs : M. **Moussa LO**, M. **Patrick GBOHOU**

Promotion [2018-2019]



IN MEMORIAM

J'aurai voulu que tu sois la première personne à qui je présenterais ce diplôme une fois rentré au pays, fruit de ce que tu as semé en moi par ton affection, tes conseils et tout ce que tu as été pour moi. Hélas, le temps en a décidé autrement et tu es parti avant que je puisse finir ma formation. Je te resterai reconnaissant à jamais maman chérie,

Elisabeth GRATADJI DIMANCHE.

DEDICACES

Au Seigneur Dieu Tout-Puissant, source de vie et de mon inspiration, maître des temps et des circonstances, l'auteur de ma réussite, que toute la gloire soit à toi !

A mon chère Papa Daniel TODJIBET , la personne à qui je serai toujours reconnaissant pour son soutien, son affection et attention soutenue sur ma personne.

A mes sœurs et frères Edithe TOUTMO, Salomen YANONDJ, Juliette MOTRA, Victoire DENMADJI, Elysée DANIMBE RONEL, Néphétali KOSSIGONE pour leur soutien indéfectible .

A ma fille Azriéla KONON , ma nièce et mes neveux Succès, Tresor, Ebénézer..

A mon amie Odette CONDE SOUA pour son soutien et ses encouragements.

A mes ami(e)s Chérubin MBAINAISSEM, Padjà DIDAYA, Romaric Singa ADOMIDJA, Christian KABA, Robert HOUNTODJI, Tatiana Farida LAMODY, Assina KABORE, Fidèle ANANIVIE, Fabrice KABORE, Sage ZAGA, Malundama Succès KUTANGILA...

A la famille du Pasteur Jean ZOUGOURI, Pasteur Behleme YOUSOUFE, et la famille Secbre MAMADOU,

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement pour la formation et les compétences que j'ai acquises à l'issue de ce cycle d'ingénieur. Je pense spécialement à tous les enseignants pour leur souci et leur implication pour nous transmettre une connaissance de qualité, une mention spéciale aussi aux personnels administratifs sans l'apport duquel l'organisation ne serait pas si simple.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur Adamah MESSAN, directeur du présent mémoire qui, malgré ses multiples occupations, n'a ménagé aucun effort pour m'aider dans la réalisation du présent travail, cela par son expertise, son encadrement et son tutorat. Je reste marqué par sa rigueur, son sens d'excellence et du travail bien fait, il constitue un de mes modèles.

Je présente mes remerciements à mon maître de stage M. Philbert NSHIMIYIMANA, doctorant à LEMHaD 2iE, je prouve ici ma profonde gratitude à son endroit. En effet, par sa rigueur, ses interventions, suggestions et commentaires qui ont été un fil conducteur pour ce travail. J'exprime aussi ma reconnaissance envers le président du jury et les membres de jury de la soutenance de ce mémoire pour leurs remarques et suggestions en vue de l'amélioration du présent document.

Merci à M. Christian RAMADJI, Ingénieur de recherche, pour sa collaboration et sa contribution à la réalisation de ce projet de recherche, ainsi qu'à M. Salif KABORE, pour son concours tout au long de cette étude. En bref je dis merci à tous les personnels et les doctorants du LEMHaD pour leur contribution.

Mes remerciements vont à l'endroit de ma famille biologique : mon père et tous mes sœurs et frères biologiques pour tout l'appui qu'ils ont été pour moi et leur affection à mon égard. Je remercie toute la grande et attentionnée famille qui s'est créée autour de moi ici au Burkina Faso (Eglise Béthel Shama, Cellule El-Victoire, Communauté Tchadienne à 2iE) ainsi que tous les ami(e)s et camarades à 2iE. Vous avez été d'un grand soutien spirituel et moral pour moi. Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail et dont l'anonymat n'insinue pas qu'ils soient oubliés, trouver ici l'expression de ma considération et ma gratitude.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

RESUME

Ce mémoire de fin d'études traite les propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées (BTC) faite à base du matériau argileux de Kamboinsé, stabilisées par les sous-produits agro-industriels disponibles au Burkina Faso : tels que le Carbure de Calcium Résiduel (CCR) et la Cendre de Balle de Riz (CBR). Les BTC fabriquées à partir de ces résidus ont contribué à l'augmentation des performances hydromécaniques, de durabilités et thermiques. La proportion de ces constituants lors de leur addition a fait l'objet d'une certaine optimisation. L'effet de l'ajout du CCR à différents dosages à la terre argileuse issue de la carrière de Kamboinsé a été étudié. Les dosages en CCR ont varié entre 0 et 25 %, à des pas de 5 %. Ce ratio est exprimé par rapport à la masse de matériau argileux sec. Les résultats ont montré une réelle amélioration du comportement. Un optimum a été observé à 15% de CCR avec une résistance à la compression qui a varié de 1.80 MPa (0 % CCR) à 4,60 MPa (15 % de CCR), l'optimum de la résistance humide a été observé à 2.60 MPa (10% de CCR), pour des échantillons maturés dans les conditions ambiantes du laboratoire à 30 °C ($\pm 5^\circ\text{C}$). Les BTC stabilisées à (25 % de CCR) résistent très bien aux tests de durabilités telles que le test d'abrasion et d'érodabilité, elles présentent un coefficient d'abrasion de $25 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ avec une perte de masse de 0.20 %, et ont une profondeur d'érosion de $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ avec une surface érodée de 3%. Du point de vue de la thermique, elles présentent de bonnes valeurs de conductivité jusqu'à $0,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les échantillons contenant 25 % de CCR. Les performances des BTC stabilisées au CCR et CBR (Cendre de Balles de Riz) ont été amélioré, par exemple les résistances sont passées de 4.30 MPa (20:0 % de CCR:CBR) à 7 MPa (16:4 % de CCR:CBR). Les BTC stabilisées à (16:4 % de CCR:CBR) ont un coefficient d'abrasion de $50 \text{ cm}^2/\text{g}$, une perte de masse de 0.03% et une profondeur d'érosion de $5.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ avec une surface érodée de 17%; mais de point de vue thermique elles présentent une conductivité un peu élevée de $0.61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ que les BTC stabilisées au CCR

Mots clés :

1. Matériau argileux
2. Carbure de calcium résiduel,
3. Cendre de balle de riz,
4. Propriétés hydromécaniques,
5. Durabilités.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

ABSTRACT

This end of study dissertation deals with properties related to the usage and durability of Compressed Earth Bricks (BTC), made from clay material, which is the soil of Burkina Faso : Stabilized by the agro-industrial by-products available in Burkina Faso : such as Residual Calcium Carbide (CCR) and Rice Ball Ash (CBR). BTCs made from these residues have contributed to the increase in Hydro mechanical, durability and thermal performance. The proportion of these constituents during their addition has been the reason for some optimization. The effect of adding CCR at different dosages to the clay soil from the Kamboinsé quarry was studied. CCR dosages ranged from 0 to 25% at 5% steps. This ratio is expressed in relation to the mass of dry clay material. The results showed a real improvement in its behavior. An optimum was observed at 15% of CCR with a compressive strength that ranged from 1.80 MPa (0% CCR) to 4.60 MPa (15% CCR), the optimum of wet strength was observed at 2.60 MPa (10% CCR), for samples matured under ambient laboratory conditions at 30 ° C (± 5 ° C). BTCs that stabilized at (25% of CCR) are very resistant to durability tests such as the abrasion and erodability test, they have an abrasion coefficient of 25 cm².g⁻¹ with a loss of mass of 0.20%, an erosion depth of 5 mm.h⁻¹ and an eroded surface of 3%. From a thermal point of view, they have good conductivity values of up to 0.58 W.m⁻¹.K⁻¹ for samples containing 25% of CCR. When we add to the CCR, the Ash of Burned Rice Ball also shows a net improvement in performances, such that, in regards to resistance, one passes from 4.30 MPa (20: 0% of CCR: CBR) to 7 MPa (16: 4% of CCR: CBR), the CCR stabilized BTC: CBR have an abrasion coefficient of 50 cm².g⁻¹ and a mass loss of 0.03% and an erosion depth of 5.6 mm.h⁻¹ with an erode surface of 17%; but from a thermal point of view they have a conductivity of 0.61 W.m⁻¹.K⁻¹ which is a little higher than the BTC stabilized at the CCR.

Key words:

1. Clay material,
2. Residual calcium carbide,
3. Rice husk ash,
4. Hydro mechanical properties,
5. Durability

LISTE DES ABBREVIATIONS ET SIGLES

Abréviation /sigle	Définition
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Å	Angström
ARS	Organisation Régionale Africaine de normalisation de Blocs de terre comprimée
AFNOR	Association Française de Normalisation
BTC	Brique de Terre Comprimée
BTC 20	Brique de Terre Comprimée ayant une résistance minimale de 2 MPa
BTC 40	Brique de Terre Comprimée ayant une résistance minimale de 4 MPa
BTC 60	Brique de Terre Comprimée ayant une résistance minimale de 6 MPa
CAH	Hydrate d'Aluminate calcique
CASH	Hydrate aluminosilicate calcique
CBR	Cendre de Balle de Riz
CCR	Carbure de Calcium Résiduel
CIM	Ciment
cm	Centimètres
CSH	Hydrate de Silicate calcique
DEsProTherm	Dispositif d'Estimation des Propriétés Thermique
K	Kelvin
kN	Kilo Newtons

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

h	Heure
LEMHaD	Laboratoire Eco-Matériau et Habitats Durables
mm	Millimètres
MPa	Méga Pascals
PH	Potentiel d'hydrogène
W	Watt

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	1
II.	RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	3
1.	LES MINERAUX ARGILEUX	3
1.1	GROUPE DE LA KAOLINITE	4
1.2	LE GROUPE DES MICAS	4
2.	STABILISATION DES ARGILES	5
2.1	STABILISATION A LA CHAUX	5
2.2	LES TYPE DE CHAUX	6
2.3	REACTIONS CHAUX-SOLS ARGILEUX	7
2.4	STABILISATION PAR L'AJOUT DU CIMENT	8
2.5	STABILISATION PAR LES CENDRES DU BALLE DE RIZ	8
3.	BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES (BTC)	8
3.1	GENERALITE SUR LES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES	8
3.2	CHOIX DE MATIERES PREMIERES DE BASE POUR BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES.	9
4.	LES PROPRIETES THERMIQUES DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES STABILISEES	11
5.	PROPRIETES HYDROMECANIQUES	12
6.	DURABILITE DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES STABILISEES	14
7.	QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES PERFORMANCES DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES	15
8.	CONCLUSION	16

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

III. MATERIAUX MATERIELS ET METHODES	17
1. INTRODUCTION	17
1.1 LES MATERIAUX ENTRANT DANS LA FORMULATION DES BTC	17
1.2 LA TERRE	17
1.3 LE CARBURE DE CALCIUM RESIDUEL (CCR)	17
1.4 LA CENDRE DE BALLE DU RIZ (CBR)	18
1.5 LES FIBRES	18
1.6 COMPOSITION DES MELANGES	18
1.7 FORMULATION, CONDITIONNEMENT ET DETERMINATION DES PROPRIETES D'USAGE DES BTC.	19
2. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	20
2.1 ESSAI DE SENSIBILITE AU RISQUE D'ABRASION	20
2.2 ESSAI D'ERODABILITE	20
3. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	20
4. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS HYGROTHERMIQUES	21
5. CONCLUSIONS	22
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS	23
1. INTRODUCTION	23
2. LES PROPRIETES PHYSIQUES ET HYDROMECHANIQUES DES BTC	23
2.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION SECHE	23
2.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION HUMIDE	26
2.3 DENSITE APPARENT	28

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

3.	LA DURABILITE DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEE	30
3.1	RESISTANCE A L'ABRASION	30
3.2	RESISTANCE A L'ERODABILITE	32
4.	PROPRIÉTÉS THERMIQUES	35
5.	CONCLUSION	37
V.	CONCLUSION GENERAL	38
VI.	PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	39
VII.	BIBLIOGRAPHIE	40
	ANNEXES 1 : MINERALOGIE DES MATERIAUX POUR BTC	xv
	ANNEXE 2 : LES DISPOSITIS EXPERIMENTAUX	xvii

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Conductivité de quelques matériaux	11
Tableau II : Classes des résistances en compression et à l'abrasion (adapte réf : la norme d'AFNOR 2001 XP P 13-901 2001)	13
Tableau III : Classification en fonction de la profondeur et du taux d'érosion à partir d'essais au goutte-à-goutte et d'essais de pulvérisation (adapter réf : NZS 4298 1998)	14
Tableau IV : composition des mélanges pour la production des BTCs stabilisées	19
Tableau V : propriétés Physiques et hydromécanique	29
Tableau VI : Tableau récapitulative de classification selon le coefficient d'abrasion Ca (cm ² /g) et la Profondeurs d'érosion (mm) en fonction de l'indice d'érosion	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Fuseaux granulaires des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)	10
Figure 2 : Fuseaux granulaires des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)	10
Figure 3 : Résistance à la compression sèche mûré à 0 jour, 45 jours et 90 jours en fonction de CCR	24
Figure 4 : Résistance à la compression sèche mûré à 0 jour, 28 jours et 45 jours en fonction de CCR:CBR	25
Figure 5 : Résistance à la compression humide après 28 jours de maturation et 45 jours de maturation en fonction de CCR	26
Figure 6 : Résistance à la compression humide après 28 jours de maturation et 45 jours de maturation en fonction de CCR:CBR	27
Figure 7 : Densité Apparente des BTC en fonction de CCR et CBR	28
Figure 8: Evolution de la résistance à l'abrasion (a) coefficient d'abrasion, (b) perte de masse par abrasion en fonction du CCR.	30
Figure 9 : Evolution de la résistance à l'abrasion (a) coefficient d'abrasion, (b) perte de masse par abrasion en fonction du CCR:CBR	30
Figure 10 : Evolution de la résistance à l'abrasion (e) coefficient d'abrasion, (f) perte de masse par abrasion en fonction de fibres.	31
Figure 11 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion, (b) surface érodée en fonction de CCR	33
Figure 12 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion (Prf E), (b) surface érodée en fonction CCR:CBR	33
Figure 13 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion (Prf E), (b) surface érodée en fonction des fibres	34
Figure 14 : Conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en (a) CCR et (b) CCR:CBR.	35
Figure 15: Valeurs de Diffusivité selon les formules des BTC (a) en fonction de CCR et (b) en fonction de CCR:CBR	36
Figure 16 : Profondeur de pénétration de chaleur	37
Figure 17 : les structures minéralogiques des argiles rencontrées dans le matériau de Kamboinsé	

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

- Figure 18 : (a) Argile quartée et tamisée, (b) Carbure de calcium résiduel séché, broyé et tamisé et (c) balle du riz incinéré à 500 degrés, (d) mélange d'argile plus carbure de calcium. xvi
- Figure 19 : Dispositif pour l'essai d'abrasion (M. Olivier et al. 1997) xvii
- Figure 20 : (a) Dispositif de test des résistances mécaniques, (b) Dispositif de fendage (M. Olivier et al. 1997) xvii
- Figure 21 : (a) Essai d'érodabilité avec une pompe à une pression de 5 bars, (b) Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC en utilisant DEsProTherm. xviii

I. INTRODUCTION GENERAL

La terre argileuse est le matériau le plus utilisé pour la construction d'habitations dans le monde entier. Ce matériau aux bénéfices multiples, tant environnementaux, socio-économiques, sanitaire et techno-architecturaux, subit tantôt des scepticismes de la société le considérant comme matériau non durable et ou pour les pauvres, car très souvent il ne répond pas aux exigences de caractéristiques mécaniques et de durabilité exigée par certaines normes. Elle fut remplacée par le béton frais et les blocs de béton, car le béton à des bonnes caractéristiques mécaniques que la terre argileuse. Mais la poudre de ciment Portland qui entre dans la composition du béton est très chère et sa fabrication cause près de 10% des gaz à effet de serre émis sur la planète. Néanmoins, vues ces multiples avantages, le matériau terre a récemment attiré l'attention de nombreux chercheurs en vue de fournir assez de connaissance scientifiques. L'adobe, et récemment les Briques de Terre Comprimées (BTC), sont parmi les techniques couramment utilisées dans la construction en terre crue. Des procédés de stabilisation et de renforcement des caractéristiques mécaniques existent, tels que:

- La stabilisation des argiles au ciment pour réduire l'utilisation des réserves naturelles en excès,
- La stabilisation des argiles à la chaux industrielle.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche menés au sein du Laboratoire Eco-Matériau et Habitat Durables (LEMHaD) de 2iE qui ont pour but « L'amélioration de la qualité de l'habitat en terre crue au Burkina Faso » tout en valorisant les matériaux disponibles localement et/ou non-conventionnels qui peuvent potentiellement contribuer à répondre à la demande de l'habitat au Burkina Faso, comme ailleurs en Afrique sub-saharienne.

Ce mémoire présente des résultats et analyses relatifs à la stabilisation de terre crue de Kamboinsé en vue de son utilisation dans la Construction des habitats. Il a pour objectif global de comprendre l'influence de la nature d'argile et du matériau de substitution tel que les sous-produits agro-industriels sur les propriétés Thermiques et les performances hydromécaniques et la durabilité des Briques de Terre Comprimées (BTC) stabilisées. Cette étude s'articule autour des objectifs spécifiques suivants :

- Détermination des propriétés thermiques des BTC stabilisées,
- Etude des performances hydromécaniques des BTC stabilisées,
- Etude de la durabilité des BTC stabilisée dans le contexte d'usage.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Le mémoire s'articulera autour des trois points :

- Au cours de la première partie nous allons aborder la revue de littérature sur la stabilisation des matériaux argileux en globale, les briques de terre comprimées stabilisées en particulier, les propriétés thermiques des BTC stabilisées, les performances hydromécaniques des BTC stabilisées, et sur la durabilité des BTC stabilisées dans le contexte d'usage.
- La seconde partie abordera les matériaux et méthode utilisés pour la réalisation des essais.
- La dernière partie consistera à mener une analyse des résultats obtenus tout en portant une discussion sur ces derniers.

Une conclusion, des perspectives et recommandations termineront cette étude.

II. RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous proposons une synthèse bibliographique sur l'étabilisation de la terre crue dans le domaine de la construction, et les Briques de Terre Comprimées (BTC). L'objectif est de présenter les différentes méthodes de stabilisation qui doivent être choisies en fonction de paramètres tels que le type de terre utilisé pour la confection des briques en terre comprimées ainsi que leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques, et aussi de présenter les différents matériaux entrant dans le processus d'étabilisation et les paramètres intervenant dans leurs caractéristiques minéralogiques et leurs propriétés d'usage.

2. LES MINERAUX ARGILEUX

Les argiles sont des roches tendres (rayables à l'ongle), elles sont fragiles à l'état sec et se brisent facilement. Elles sont constituées des particules très fines, et aux propriétés mécaniques particulières, notamment en présence d'eau : des phénomènes de gonflement, de dispersion, d'hydratation et elles ont un contact collant. Plusieurs composés peuvent entrer dans la constitution des argiles : les argiles à montmorillonite issues de l'altération des roches éruptives d'épanchement, les roches vitreuses et microlitiques (basalte), des argiles à kaolinite provenant de l'altération des roches grenues acides, surtout de leurs feldspaths.

Les silicates d'alumine hydratés forment des feuillets, constitués d'une combinaison de structures simples : assemblages tétraédriques et octaédriques. Les tétraèdres sont constitués d'un atome central de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène (SiO_4), tandis que les octaèdres d'un ion métallique central (Al_3^+ , Fe_2^+ , Mg^+) entouré d'ions OH^- . Ces structures simples se superposent sous forme de deux ou trois couches pour former une unité d'argile. Un feuillet est la répétition latérale d'unités d'argile. Par exemple, la superposition d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, dont l'ion métallique est un ion d'aluminium, forme une kaolinite voir annexe 1 (Figure 17a). Lorsque deux feuillets de kaolinite sont superposés, une grande stabilité vis-à-vis des actions de l'eau est rendue possible par une liaison hydrogène OH^- forte. Généralement, il faut un empilement d'une centaine de feuillets pour constituer une particule de kaolinite. Exemple de la superposition de trois couches : une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques. L'ion métallique de la couche octaédrique définit généralement la nature de l'argile. Les montmorillonites comportent un ion d'aluminium. Les feuillets de montmorillonite comportent un déficit de charges, qui les rendent instables vis-à-vis de l'eau, ce qui se caractérise par une attraction des molécules d'eau (en tant

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

que molécules dipolaires) ou des cations présents dans l'eau. Les particules de montmorillonite sont constituées de 3 à 10 feuillets. Par ailleurs, l'illite possède la même composition que la montmorillonite, mais la présence de K^+ (potassium) entre les feuillets permet une liaison forte. Ainsi, comme la kaolinite, l'illite est stable vis-à-vis de l'eau.

2.1 GROUPE DE LA KAOLINITE

La kaolinite est une espèce minérale composée de silicate d'aluminium hydraté, de formule $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ du groupe des silicates, sous-groupe des phyllosilicates. C'est un minéral argileux de type 1/1 dioctotaédrique, Elle est aussi l'exemple typique d'une argile non gonflante. Elle se forme à une concentration égale de Si (Silicium) et d'Al (Aluminium). Le feuillet élémentaire est formé par une couche de tétraèdres de silicium et une couche d'octaèdres d'aluminium, Si et Al occupent respectivement le centre des tétraèdres et des octaèdres voir annexe 1 (Figure 17b). On distingue deux sous-groupes dans cette famille de minéraux argileux :

- Le groupe de la serpentine, où la couche octaédrique est de type « brucite »,
- Le groupe de la kaolinite, où la couche octaédrique est de type « gibbsite ».

Les liaisons entre les différentes couches sont relativement rigides et sont principalement assurées par les forces de Vander Waal et les liaisons hydrogène. Outre les deux groupes précédents, on distingue dans cette famille le groupe des halloysites, L'épaisseur d'une couche de kaolinite est de 7,2 Å (Ångström), tandis qu'une couche d'halloysite hydratée a une épaisseur de 10 Å.

2.2 LE GROUPE DES MICAS

Argiles du type 2/1 du groupe des silicates sous-groupe des phyllosilicates formé principalement de silicate d'aluminium et de potassium. Avec le quartz et le feldspath, il est l'un des constituants du granit.

La structure de base des minéraux de cette famille résulte de l'association d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques, qui l'entourent. Cependant, le quart des cations Si_4^+ est remplacé par des cations Al_3^+ voir annexe 1 (Figure 17c). Il en résulte un déficit de charges, compensé par l'adsorption d'ions de potassium K^+ , qui s'intercalent entre les feuillets

3. STABILISATION DES ARGILES

La stabilisation est une technique qui permet d'améliorer la portance et le comportement à l'eau d'un sol ou d'un matériau moyennant l'ajout d'un liant hydraulique (ciment, chaux...) ou d'un liant hydrocarboné (bitume, émulsion de bitume...), afin de lui conférer des propriétés particulières permanentes et supérieures à l'état initial. On cherche en général à augmenter la résistance mécanique, réduire la porosité, réduire la sensibilité à l'eau et aux agressions extérieures et obtenir une meilleure cohésion. Les deux techniques de stabilisation les plus utilisées pour valoriser les matériaux argileux sont les suivantes:

- ✓ Traitement aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés (traitement physico-chimique)

Les liants hydrauliques sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés et ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral (contrairement aux produits de type colle qui eux ne peuvent qu'adhérer au squelette minéral) Parmi les stabilisations les plus couramment utilisées, on distingue :

- Stabilisation à la chaux ;
- Stabilisation au ciment ;
- Stabilisation en cendres volantes.

- ✓ Traitement avec un matériau non argileux (traitement physico-mécanique)

Il s'agit de mélanger le matériau argileux gonflant avec un autre d'argilosité presque nulle, ce sont par exemple les sables, les graviers. Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent même, l'activité du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.

3.1 STABILISATION A LA CHAUX

La stabilisation à la chaux a commencé à partir de 1920, aux Etats-Unis, les sols sont systématiquement traités à la chaux, notamment pour la réalisation de routes. La chaux augmente la résistance à la compression de la terre, la résistance à la traction étant fonction de la quantité et de la qualité des argiles de la terre, de faibles quantités de chaux (1 à 2 %) diminuent fortement le retrait au séchage et suppriment le gonflement à l'humidité. Pour que cette technique soit efficace, les terres utilisées doivent contenir une fraction argileuse non

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

négligeable. Les sols riches en silicates d'alumine, silice et hydroxydes de fer donnent de bons résultats. La présence de matière organique et de sulfates est moins néfaste que pour le ciment.

L'ajout de la chaux peut améliorer considérablement les propriétés mécaniques des matériaux avec lesquels elle est mise en réaction. Il y a deux formes d'amélioration :

- ✓ La modification ;
- ✓ La stabilisation.

La modification c'est la phase où il y'a l'échange de cations calcium apportés par la chaux éteinte et des cations normalement présents absorbés à la surface de l'argile. Il y a aussi la modification par la réaction de la chaux éteinte avec la surface argileuse dans un environnement au pH élevé, la minéralogie de la surface argileuse est altérée lorsqu'elle réagit avec les ions de calcium pour former des produits cimentaires. Il en résulte une réduction de la plasticité et du gonflement, une réduction de la capacité de rétention de l'humidité, et une plus grande stabilité. La stabilisation intervient lorsqu'on ajoute une quantité adéquate de chaux à un sol réactif. Elle diffère de la modification par le fait qu'un niveau important du gain de solidité à long terme se développe grâce à la réaction pouzzolanique. Cette réaction n'est rien d'autre que la formation d'hydrates de silicate de calcium et d'aluminates de calcium lorsque le calcium de la chaux réagit avec les aluminates et les silicates solubilisés de la surface d'argile.

3.2 LES TYPE DE CHAUX

On distingue plusieurs catégories de chaux en fonction de leurs compositions et de ses usages :

- ✓ Chaux aérienne est produite à partir de calcaires très purs, utilisée préférentiellement pour stabiliser,
- ✓ Chaux hydraulique, semblable au ciment, peu recommandée pour la stabilisation même si les naturelles ont un pouvoir stabilisant plus important que les artificielles,
- ✓ Chaux agricole, est utile pour fertiliser les terres, elle ne présente pas d'effet stabilisant,
- ✓ Chaux dolomitique, contient du magnésium utilisable en stabilisation mais avec une réaction très lente.

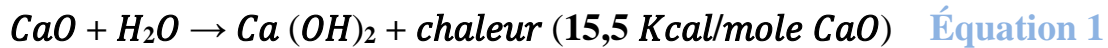
La chaux aérienne est celle qui intervient le plus souvent dans le domaine de la construction. Elle se décompose en deux catégories selon son état d'hydratation :

- ✓ Chaux vive : produite par la cuisson de la pierre à chaux. Elle réagit directement avec l'eau par une réaction exothermique jusqu'à 150°C pour former de la chaux éteinte, ce qui exige un stockage particulier. A masse égale, elle est plus efficace que la chaux

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

éteinte, elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %).

- ✓ Chaux éteinte Ca(OH)₂ couramment utilisée en stabilisation, elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ et est généralement fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique :



L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne une pulvérisation très fine du produit. Une chaux hydratée pour le traitement des sols est selon la norme NBN EN 459 à définir comme IDRRIM (2015).

3.3 REACTIONS CHAUX-SOLS ARGILEUX

Selon MILLOGO (2007), l'ajout de la chaux contribue à l'action de quatre mécanismes de bases en lien avec les particules les plus fines du mélange :

- ✓ Échange cationique : avec l'ajout d'eau au mélange terre-chaux, les ions calcium Ca²⁺ contenus initialement dans la chaux passent en solution. Ils peuvent alors se substituer à d'autres ions appartenant à la terre (sodium, potassium, magnésium et hydrogène). C'est le phénomène d'échange cationique qui dépend de chaque type de terre.
- ✓ Flocculation et agglomération : les particules échangées contribuent à modifier la configuration de l'eau interstitielle entre particules et augmentent les charges en présence des particules. Les particules vont alors avoir tendance à s'agglutiner pour former des ensembles plus gros, modifiant ainsi la granulométrie et la texture de la terre.
- ✓ Carbonatation : une fraction de la chaux réagit avec le gaz carboniques (CO₂) pour former du carbonate de calcium (calcite CaCO₃) selon la réaction suivante :



- ✓ Réaction pouzzolanique: phénomène majoritaire contribuant à l'augmentation de résistance créé par l'addition de chaux. Le pH basique de l'hydroxyde de calcium permet une dissolution des argiles qui contribue au réarrangement de silicates et de l'alumine pour former des silicates de calcium hydratés et aluminates de calcium hydratés.

Notons que l'ajout de chaux contribue également à une absorption d'eau non négligeable, d'autant plus s'il s'agit de chaux vive.

3.4 STABILISATION PAR L'AJOUT DU CIMENT

La stabilisation au ciment remonte au début du XXe siècle aux Etats-Unis. Très vite, la technique s'est répandue dans le monde entier et s'est élargie à de nombreux domaines. On observe quotidiennement ses applications dans les domaines de travaux publics et du bâtiment. Cette technique permet de diminuer la masse volumique des terres se compactant bien, d'augmenter la résistance à la compression et à la traction, de minimiser les variations dimensionnelles (retrait au séchage et gonflement à l'humidité) et d'augmenter la résistance à l'érosion par l'eau. Les terres sableuses sont celles qui se prêtent le mieux à ce type de stabilisation, bien que quasiment tous les types de terres soient compatibles. D'après HOUBEN et GUILLAUD (2006) les teneurs de plus d'1 % en matière organique et de plus de 2-3 % en sulfates sont nocives à l'ajout de ciment.

3.5 STABILISATION PAR LES CENDRES DU BALLE DE RIZ

Il existe des matériaux pouzzolaniques divers mais parmi eux, la balle de riz s'avère très intéressante. La balle est l'enveloppe du grain de riz qui constitue, après calcination et broyage, un matériau avec une composition quasiment exclusive d'oxyde de silice. De même, la réactivité des pouzzolanes constituées de balles de riz calcinées, est fonction de sa phase amorphe. Cette réactivité contient 80% de silice réactive. La méthode de calcination (température et temps) influence fortement la part de cette phase vitreuse. Selon ANH-TUAN, CHEN et al (2011) les paramètres des propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux de construction stabilisés aux cendres végétales dépendent de la réactivité de ces pouzzolanes.

4. BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES (BTC)

1. GENERALITE SUR LES BRIQUE EN TERRE COMPRIMEES

La Brique de Terre Comprimée (BTC) est une technique relativement récente, mise au point en 2009 par Fontaine et Anger. La norme ARS 670 (1996) définit les BTC comme des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières, contrôlées et obtenues par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. La production des BTC se fait généralement en cinq étapes que sont:

- ✓ La première étape de fabrication des BTC consiste à briser les mottes et à tamiser la terre afin d'obtenir un mélange homogène fin (nécessité d'au moins 50 % de grains de granulométrie < 5mm);

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

- ✓ Le malaxage est très important pour une bonne homogénéisation, il se fait d'abord à sec puis par ajout d'eau, avec ou sans additif;
- ✓ Le temps de retenue : C'est un intervalle de temps entre le début du malaxage humide de la terre et la compression de la terre;
- ✓ Ensuite vient l'étape de la compression-moulage: celle-ci peut être de plusieurs types en fonction de la terre utilisée, du mode de moulage et de la presse;
- ✓ Enfin vient l'étape de la cure: C'est la période suivant la compression pendant laquelle se déroulent principalement deux types de phénomènes:
 - Les réactions physico-chimiques entre les différents composants du mélange; et surtout entre la terre et les additifs, conduisent à la stabilisation du bloc;
 - Le séchage qui correspond à l'évacuation progressive de l'humidité de fabrication par évaporation.

La fabrication des briques en terre comprimée (BTC) doit respecter certaines normes spécifiques de contrôle de la qualité des produits, depuis l'étape de l'identification et la sélection des terres jusqu'au suivi de la qualité des BTC. L'argile est le premier liant des BTC contenue dans la terre, mais lorsque la terre est simplement compressée, souvent elle ne répond pas aux rigueurs et critères requis. Par exemple la résistance à la compression ou encore la tenue vis-à-vis d'un milieu saturé en eau, mais les performances des BTC peuvent être améliorées comme indiqué plus haut.

2. CHOIX DE MATIERES PREMIERES DE BASE POUR BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES.

Le choix de la terre est nécessaire dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie approprié pour la construction en terre. Toutes les terres ne conviennent pas pour la fabrication des BTC. Une terre impropre à la construction ne fournira jamais une bonne brique, même stabilisée. Il faut d'abord identifier les matériaux au préalable. La norme ARS-680 HOUBEN (1998) recommande certains critères pour le choix de la terre afin d'assurer la qualité, et la réactivité des matériaux utilisés. Ces recommandations se focalisent principalement sur la granularité et la plasticité des matériaux:

- ✓ La granularité de la terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture représenté en Figure 1, et dont elle épousera de préférence l'allure générale. La latérite ne doit pas être trop argileuse au risque d'entraîner du retrait et des fissurations fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} \leq 30 \%$). Les gros éléments du matériau ne doivent pas

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

dépasser une taille limite qui dépend de la taille des blocs; une moyenne de 5 mm est prescrite;

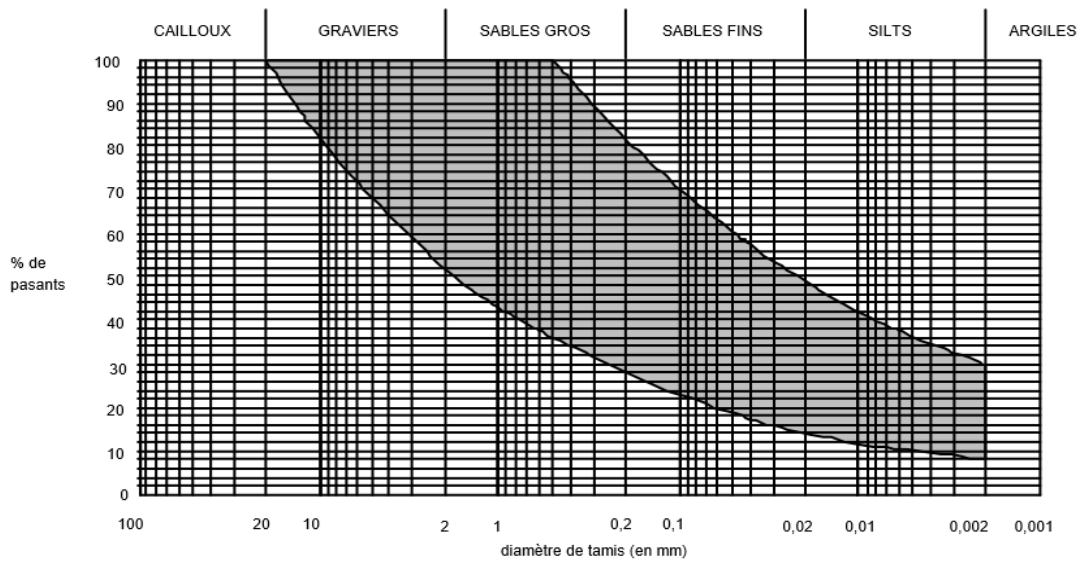


Figure 1 : Fuseaux granulaires des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)

- ✓ La Plasticité de la terre, désignée par sa limite de liquidité à la coupelle de Casa grande et sa limite de plasticité au rouleau, sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité en Figure 2. Le matériau de base doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ($\% 2\mu\text{m} \geq 5\%$).

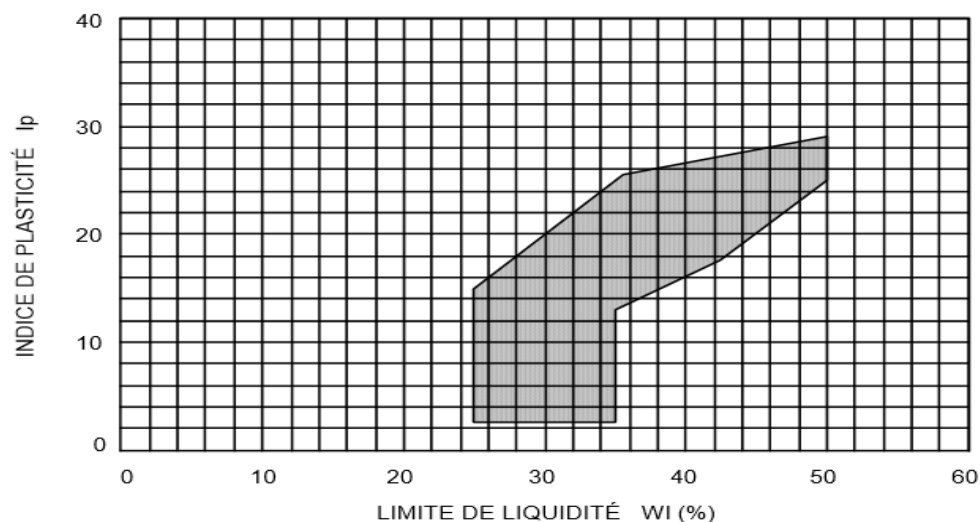


Figure 2 : Fuseaux granulaires des matériaux recommandés pour les BTC (H. Houben 1998)

5. LES PROPRIETES THERMIQUES DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES STABILISEES

La sensation que ressent une personne, par rapport à la température et à l'humidité ambiante, dans une pièce où elle se trouve, diffère selon les individus, tout le monde n'ayant pas les mêmes critères de confort, ne s'habillant pas de la même manière, s'accoutumant plus ou moins bien aux conditions climatiques extérieures, n'ayant pas besoin du même niveau de température pour se sentir bien. C'est ainsi qu'il est important de connaître les propriétés thermiques des matériaux qu'on utilise pour la construction de nos habitats.

o La conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement d'un matériau lors du transfert thermique par conduction. Elle représente l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur par unité de largeur et par degré de différence de température. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$. Plus sa valeur est faible, plus le matériau est isolant (Tableau I). La conductivité thermique est le facteur de proportionnalité qui apparaît dans la loi de Fourier.

$$\lambda = \frac{E}{\rho * Cp} \quad \text{Équation 3}$$

Avec : E: est l'effusivité thermique ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$); Cp: la chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), λ : conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$); ρ : densité apparente ($kg.m^{-3}$).

Tableau I : Conductivité de quelques matériaux

Matériaux	λ Conductivité ($W m^{-1} K^{-1}$)
Ciment portland	0.29
Caoutchouc	0.16
Brique plein	1.16
BTC	0.81 - 1.04
Polystyrène	0.209

o Chaleur spécifique Cp

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1K la température d'une unité de masse de ce même matériau. Elle est exprimée en $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Il existe aussi ce que nous appelons "la capacité massique ou capacité calorifique Cp qui traduit l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer (élévation de sa température) de ΔT .

$$Cp = \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{Équation 4}$$

Avec: Cp: capacité calorifique; Q: quantité de chaleur et ΔT : gradient de température

Dans la pratique, et pour définir une propriété du matériau indépendante de sa masse (m), on utilise la chaleur spécifique Cp.

$$Cm = \frac{Cp}{m} \quad \text{Équation 5}$$

Avec: Cm: capacité massique; Cp: capacité calorifique et m : masse du matériau.

- **Effusivité**

L'effusivité thermique mesure la propriété qu'a un corps d'arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact. Physiquement, elle représente la capacité d'un milieu à résister (en température) à une perturbation thermique. Elle s'exprime en $J.m^{-2}.s^{-1/2}.K^{-1}$. Laaroussi et al (2013) ont déterminé les propriétés thermiques d'une brique de terre brûlée provenant d'une maçonnerie industrielle marocaine. Leurs résultats donnent une conductivité une effusivité thermique moyenne de $705 W. m^{-2}.K^{-1}$.

$$E = \sqrt{\lambda Cp} \quad \text{Équation 6}$$

Avec: Cp: capacité calorifique et λ : conductivité thermique ($W.m^{-1}.k^{-1}$).

- **Diffusivité**

La diffusivité thermique correspond au rapport de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique elle s'exprime en $m^2.s^{-1}$. Ce paramètre caractérise la cinétique de réponse du milieu à une perturbation thermique.

$$a = \frac{\lambda}{\rho * Cp} \quad \text{Équation 7}$$

6. PROPRIETES HYDROMECHANIQUES

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression est généralement considérée comme la meilleure propriété pour caractériser les performances mécaniques des briques de terre comprimée car elle est généralement indirectement liée à leur qualité et durabilité, elle dépend essentiellement de la composition du type de sol et de la teneur en stabilisant, de la pression de compactage et de la teneur en eau d'après MANSOUR et al (2016); WALKER (2006) ; NAGARAJ et al (2014);

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

WALKER (2004). NAMANGO (2006) avec une stabilisation de 5% à 12% de ciment a obtenu des résistances à la compression à sèche de 3,5 à 8 MPa avec une pression de compactage de 300 kN et un taux de chargement de 0.5 kN/s.

SORE (2017) a obtenu les résistances en compression sèche allant de 2.81 à 8.95 MPa avec les BTC stabilisé aux taux de 5 % à 20% géopolymère. Il a noté que les BTC stabilisées avec au moins 10% de géopolymère présentant des valeurs de compression supérieures au 4 MPa recommandée par la norme XP P13-901 AFNOR 2001 pour une construction en terre, mais il a signalé que les résistances en compression des BTC non stabilisées (BTC 0%) est la plus faible avec une valeur de 1,36 MPa contre 8,10 MPa pour les BTC stabilisées au ciment. Par ailleurs avec les échantillons imbibés dans l'eau pendant 2 heures avant la réalisation de l'essai de compression humide, l'auteur n'a observé qu'une réduction des résistances en compression de l'ordre de 50 % pour tous les matériaux. Et il a noté 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. NSHIMIYIMANA et al (2018), ont obtenu des valeurs de la résistance à la compression qui varie de 1,9 MPa avec des échantillons non stabilisés, à 3,4 MPa avec des échantillons stabilisés à un taux de stabilisation optimal de 8% de CCR. Les valeurs des résistances à la compression sèche, humide et à l'abrasion recommandées selon la norme d'AFNOR 2001 XP P 13-901 sont classé dans le tableau II ci-dessous :

Tableau II : Classes des résistances en compression et à l'abrasion (adapte réf : la norme d'AFNOR 2001 XP P 13-901 2001)

Blocs pleins	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Résistance minimale sèche à la compression (MPa)	2	4	6
Résistance minimale humide à la compression (MPa)	1	2	3
Résistance à l'abrasion (cm ² /g)	2	5	7

En outre, aucun de ses résultats ne doit être inférieur à 0,8 fois la valeur de cette résistance.

7. DURABILITE DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES STABILISEES

La durabilité des BTC est l'une des préoccupations majeures exprimée par les chercheurs et les utilisateurs, car les connaissances sont moins consolidées sur cette question, c'est difficile à appréhender puisqu'elle fait intervenir à la fois les propriétés du matériau, les conditions extérieures et du climat local etc. Les tests de durabilité les plus courants sont liés à l'eau, car même sans produits chimiques, l'eau peut affecter de manière significative la durabilité. Les tests de laboratoire les plus largement utilisés comme indicateurs de durabilité sont : La résistance à la compression et l'absorption d'eau. Cependant, d'autres tests visant à simuler différentes actions de pluie ont été réalisés, tels que le test goutte à goutte et l'essai d'érosion par pulvérisation d'eau selon CID-FALCETO MAZARRON et al (2012); ainsi que GUETTALA et al (2002).

○ L'essai d'érosion par pulvérisation

L'essai d'érosion par pulvérisation consiste à pulvériser un jet d'eau (à pression constante) sur la surface d'une BTC stabilisé pendant un temps donné. Cette méthode de pulvérisation d'eau a été considérée comme la meilleure simulation du vieillissement naturel. Cependant, il n'existe toujours pas de test standard consensuel pour évaluer cette propriété. Cid-Falceto, MAZARRON et al (2012) ont étudié l'érosion hydrique des blocs au moyen d'un test de pulvérisation en utilisant une pression d'eau de 50 kPa à une distance de 470 mm. Mais l'auteur n'a signalé aucune érosion sur des blocs stabilisés, mais la pénétration complète de blocs non stabilisés.

Tableau III : Classification en fonction de la profondeur et du taux d'érosion à partir d'essais au goutte-à-goutte et d'essais de pulvérisation (adapter réf : NZS 4298 1998)

Test de goutte à goutte	Test de pulvérisation	Classification
Profondeur d'érosion DE (mm)	Taux d'érosion DE (mm/h)	Indice d'érosion
-	$0 \leq DE/heure \leq 20$	1
$0 \leq DE \leq 5$	$20 \leq DE/heure \leq 50$	2
$5 \leq DE \leq 10$	$50 \leq DE/heure \leq 90$	3

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

$10 \leq DE \leq 15$	$90 \leq DE/\text{heur} \leq 120$	4
$15 \leq DE$	$120 \leq DE/\text{heur}$	5 a rejeté

○ Essai de goutte à goutte

L'essai au goutte-à-goutte consiste essentiellement à laisser des gouttelettes d'eau pénétrer sur une surface de bloc inclinée pendant un temps donné. Le test d'égouttement consiste à déposer 100 ml d'eau en gouttes sur la surface d'un demi-bloc placé à un angle de 27° cela a pour but de simuler un impact de pluie légère sur bloc en terre comprimé, afin de déterminer la profondeur de pénétration de l'humidité. Voir le détail dans le tableau III

○ Essai de l'abrasion

Cet essai, qui consiste à gratter la surface du bloc à l'aide de la brosse métallique, est considéré comme un test trop sévère pour évaluer la durabilité, à raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute (soit 60 aller-retours) sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation. La largeur brossée du bloc ne doit excéder de plus de 2 mm la largeur de la brosse. Le coefficient d'abrasion ζ_a doit être supérieur ou égale à 2 mm. Voir le détail dans le tableau II.

8. QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LES PERFORMANCES DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEES

SORE (2017), a utilisé le métakaolin pour stabiliser des argiles, du point de vue des performances mécanique, il a obtenu des résistances allant jusqu'à 8,95 MPa à la compression sèche et 6,29 MPa à la compression humide. Du point de vue thermique, les résultats ont montré des valeurs de conductivité allant jusqu'à 0,71 W.m⁻¹.K⁻¹ pour les valeurs les plus faibles des BTC stabilisées. NSHIMIYIMANA et al (2018), ont utilisé le CCR pour la stabilisation de leur BTC et ont obtenu des valeurs de résistance à la compression passant de 1,9 MPa pour une BTC sans stabilisant, à 3,4 MPa pour un taux de stabilisation optimal de 8% de CCR. SENI MOUSSA (2019) a obtenu des résistances allant 2.62 MPa à 3.40 MPa pour des échantillons maturés dans les conditions ambiantes du laboratoire à 30°C (+. 5°C) et une hausse résistance de 6.92 MPa pour les échantillons contenant 20% de CCR mûré à température constante de 40°C. Du point de vue thermique elles présentent de bonnes valeurs de conductivité jusqu'à 0.4

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

W.m⁻¹.K⁻¹ pour les échantillons contenant 20% de CCR. AZIABLE (2019) à observer une baisse de la résistance à la compression sèche de près de 17% suite à l'ajout des fibres plastiques à 0,2 % (4,08 MPa) par rapport aux BTC témoins de 4,92 MPa (0% de fibres).

9. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif, à partir de la littérature disponible, de passer en revue les connaissances actuelles dans le domaine de l'stabilisation de la terre crue et les Briques de Terre Comprimées (BTC). Les différentes matières premières entrant dans le processus d'stabilisation ont permis de comprendre l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Mais la stabilisation est une affaire complexe étant donné qu'elle inclut un grand nombre de paramètres à intégrer dès la conception.

L'utilisation des matériaux argileux pour la fabrication de BTC utilisées dans les constructions en terre, les principales propriétés et les paramètres influençant les propriétés ont fait l'objet de plusieurs études antérieures. S'agissant des BTC, il ressort de la littérature que la latérite et la terre argileuse sont les matrices principales des BTC. Cependant, dans le contexte du Burkina Faso, la latérite est la matrice la plus utilisée en raison de la disponibilité des gisements importants. Elle doit être soigneusement et préalablement caractérisée afin d'éviter les mauvaises terres (terre végétale, terre trop argileuse pour la stabilisation au ciment, etc.) pour la production des BTC.

III. MATERIAUX MATERIELS ET METHODES

1. INTRODUCTION

Dans cette partie, nous décrivons la méthodologie du travail adoptée, les divers essais effectués, la méthode de traitement des résultats obtenus, ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre pour les différents tests. L'ensemble des essais ont été effectués au Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) à 2iE sur le site de Kamboinsé.

1.1 LES MATERIAUX ENTRANT DANS LA FORMULATION DES BTC

Les matériaux que nous avons utilisés dans le cadre de cette étude sont : la terre de Kamboinsé, le carbure de calcium résiduel et la cendre de balle de riz. Certains de ces éléments ont fait objet de différents essais pour leur caractérisation.

1.2 LA TERRE

La terre crue que nous avons utilisée est un sol argileux rougeâtre extrait de la localité de Kamboinsé (N 12°29.399', W 001°32.981', alt. 322 m) au Burkina Faso voir annexes 1 (Figure 18a), tamisé avec un tamis 5 mm de diamètre pour éliminer les granulats de diamètre supérieur afin de faciliter un mélange homogène et une interaction avec le liant. Elle contient 30% de particules d'argile dominé principalement par l'argile kaolinite (76%), du quartz (11%) et de la goethite estimée (9%), respectivement 59% de limon et de sable et 11% de gravier. Elle a un indice de plasticité de 16, limite de liquidité de 45, une densité spécifique de 2.75 g.cm⁻³ et une densité sèche maximale de 1,76 g.cm⁻³ à une teneur en eau optimale de 17,4%. Sa composition chimique révélait principalement de la silice (51%), de l'alumine (24%) et des oxydes de fer III (13%). La terre de Kamboinsé contient principalement de l'argile kaolinite, du quartz et de la goethite estimée à 76%, 11% et 9%, respectivement.

1.3 LE CARBURE DE CALCIUM RESIDUEL (CCR)

Le Carbure de Calcium Résiduel (CCR) est un sous-produit blanc grisâtre contenant jusqu'à 90% de chaux hydratée (Ca (OH)₂) qui peut potentiellement être utilisé pour la stabilisation de sols en géotechniques. La phase liquide d'acétylène sera transformée en gaz après passage au séchoir à basse pression et la solution concentrée de chaux éteinte quant à elle va être stockée dans une piscine et se transformé en poudre au cours du temps et sous l'action du soleil. Il se forme selon l'équation suivante:



Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Le CCR a été collecté auprès de Burkina industriel gaz dans la localité de Kossodo de (N 12°25.935', W 001°29.374', alt. 301m). Il a été écrasé en utilisant la Machine et billes los Angeles broyées jusqu'à ce que 90% des particules soient plus fines que 125 µm voir annexes 1 (Figure 18c). Sa composition chimique montre une prédominance de CaO (67%), La composition minérale de CCR a révélé la présence de portlandite (Ca(OH)_2). Le CCR contient également des minéraux carbonatés tels que l'aragonite (20%), la calcite (16%)

1.4 LA CENDRE DE BALLE DU RIZ (CBR)

Les balles de riz étaient récoltées dans la localité de Bagrès (N 11°28.43', W 00°32.12', alt. 23m) et incinéré à 500 degrés pendant 5 heures dans un four à moufle pour former de la CBR de couleur grise voir annexes 1 (Figure 18b). Le CBR représente la balle de riz incinéré et broyé jusqu'à ce que 95% des particules soient plus fines que 80 µm.). La Cendre de Balle de Riz (CBR), est un autre sous-produit, qu'on utilise pour une activité pouzzolanique. La composition chimique montre que le CBR contient 90% de la silice au totale, la fraction réactive de silice était de 68%, et avec densité spécifique de 2,24 g.cm⁻³.

1.5 LES FIBRES

Les fibres incorporées dans le matériau, sont de fibres végétales, qui ont une alternative intéressante en tant que matériau naturel pour renforcer les briques. L'introduction de fibres dans les BTC nécessite non pas une granulométrie fine mais une bonne séparation des fibres et une longueur de fibres précise entre 1cm à 5cm. Elles agissent sur les résistances mécaniques, les performances thermiques et encore d'autres aspects:

- ✓ Accélération du séchage, par l'effet drainant des canaux de fibres,
- ✓ 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.

1.6 COMPOSITION DES MELANGES

En ce qui concerne les différentes formulations faites et les compositions des mélanges, plusieurs cas ont été abordés. Il s'agit en premier lieu de voir le comportement des BTC sans stabilisants vis-à-vis des différents paramètres d'usage, ensuite, il a été question d'observer l'influence de l'ajout du CCR à différents dosages (5% à 25%), puis pour un mélange de 20% de CCR, de substituer successivement (10%, 20 %, 30 % et 40%) de CBR et de 8% de ciment afin d'évaluer les propriétés hygrothermiques et durabilités de ces briques.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Tableau IV : composition des mélanges pour la production des BTCs stabilisées

Désignation	Stabilisateur (%)			Eau (%)	Sols (kg)	Stabilisant (kg)			Total du mélange	Total Solide	Eau	Poids total (kg)
	CCR	CBR	CIM			CCR	CBR	CIM				
C8P0	0	0	8	19	8.150	0	0	1.524	9.674	9.674	1.549	11.22
L0P0	0	0	0	17	6.900	0	0	0	6.900	6.900	1.173	8.073
L5P0	5	0	0	18	6.350	0.318	0	0	6.668	6.668	1.143	7.868
L10P0	10	0	0	19	5.850	0.585	0	0	6.435	6.435	1.112	7.658
L15P0	15	0	0	21	5.450	0.818	0	0	6.268	6.268	1.145	7.584
L20P0	20	0	0	22	5.100	1.020	0	0	6.120	6.120	1.122	7.466
L25P0	25	0	0	23	4.700	1.175	0	0	5.875	5.875	1.080	7.226
L20P10	18	2	0	22	5.750	1.035	0.115	0	6.900	6.900	1.518	8.418
L20P20	16	4	0	22	5.750	0.920	0.230	0	6.900	6.900	1.518	8.418
L20P30	14	6	0	22	5.750	0.805	0.345	0	6.900	6.900	1.518	8.418
L20P40	12	8	0	22	5.750	0.690	0.460	0	6.900	6.900	1.518	8.418

1.7 FORMULATION, CONDITIONNEMENT ET DETERMINATION DES PROPRIETES D'USAGE DES BTC.

Le choix de la terre est nécessaire dans le processus de formulation des BTC, car toutes les terres ne conviennent pas pour la fabrication des BTC, après avoir fait le choix de terre, on peut à présent passer à la formulation. On établit différentes formules et dosage des matériaux selon les objectifs fixés. Comme il est prévu des essais sur des triplets, on met en œuvre les différentes quantités pour la formulation des briques trois par trois. Après malaxage, on essaye autant de conserver la teneur en eau en couvrant le récipient de malaxage et en moulant les BTC aussi vite que possible. Un calibrage a d'abord été fait en amont pour déterminer la quantité optimale de mixture à mettre dans le moule pour obtenir des éprouvettes ni trop pleines, ni trop vides. Pour le moulage, la presse à BTC normalisée manuelle produisant des briques parallélépipédiques de (29,5 x 14,5 x 9,5 cm³) a été utilisée. Après formulation et production, on passe à l'étape de la maturation, les échantillons contenant des liants doivent être mûrés dans un milieu qui conserve l'humidité, c'est ainsi que les briques sont emballées dans des plastiques et le vide d'air est fait. La maturation peut se faire à température ambiante (variable selon les moments de la journée ou de l'année), ou encore à température contrôlée grâce à des étuves et enceintes dédiées à cet effet. Selon HORPIBULSUK, PHETCHUAY et al (2012), la maturation des échantillons stabilisés à la chaux dure 45 jours car au-delà de cette période, les réactions se sont déjà déroulées à plus de 95%, la maturation des BTC stabilisés avec la Cendre

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboisé -Burkina Faso

de Balle du Riz (CBR) et la chaux dure 28 jours ainsi que les échantillons stabilisés au ciment. Nous avons décidé de laisser les autres échantillons stabilisés à la chaux durant 90 jours pour voir si au-delà de 45 jours il y aura encore d'autres réactions. Après maturation, les échantillons sont séchés à température ambiante jusqu'à la masse constante.

2. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

2.1 ESSAI DE SENSIBILITE AU RISQUE D'ABRASION

L'essai d'abrasion a pour but de simuler le comportement des BTC vis-à-vis des différentes érosions pouvant être dues à l'activité humaine, ou au vent charriant des granulats. Cet essai est réalisé en utilisant une brosse métallique en acier du type de celle décrite à l'annexes 2 (Figure 19) et chargée d'une masse de 3 kg est utilisée pour simuler ces effets. À raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute (soit 60 allers-retours) sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation, ces effets sont simulés et mesurés. Pour réaliser l'essai conformément à la norme, on conserve les blocs pendant 24 h au moins, dans un local clos, à l'abri de l'humidité. On les pèse et on les numérote. On pose les blocs tour à tour sur un plan de travail horizontal pour le brossage. Le coefficient d'abrasion "Ca" est conventionnellement exprimé par la formule à l'équation 9 :

$$Cab = \frac{S}{m_0 - m_1} * 100 \quad \text{Équation 9}$$

Avec : C_{ab} ($m^2 \cdot g^{-1}$) le coefficient d'abrasion, m_0 (g) masse de la BTC avant abrasion, m_1 (g) masse de BTC après abrasion et S (cm^2) section abrasée de la BTC.

2.2 ESSAI D'ERODABILITE

Essai d'érodabilité consiste à simuler les BTC à un phénomène de vieillissement naturel dû à l'effet de pluie. Pour mener cet essai nous avons soumis nos échantillons à une pression constante d'eau de 50 kPa. Les BTC testées sont placées à une distance de 470 mm et à chaque 15 minute on mesure la profondeur de pénétration d'eau mais aucun signe d'érosion n'a été signalé sur les blocs stabilisé. Ensuite, nous avons augmenté la pression d'eau constante à 500 kPa sur la surface et cela nous a donné des résultats significatifs voir Annexe 2 (Figure 21 a).

3. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Nous avons découpé transversalement par sciage les BTC dimensions normalisées ($29.5 \times 14.5 \times 9,5$ cm^3) en deux parties égales voir annexes 2 (Figure 20b), puis nous avons

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

superposé les deux moitiés correspondantes de chaque bloc par leur face de pose et nous les avons testés par le biais d'une presse hydraulique (ETI-PROETI) avec une capacité de 300 kN et un taux de chargement de 0,5 kN/s. Nous nous sommes référés à la norme XP P13-091-2001 pour réaliser ce test. La résistance à la compression des BTC est la propriété mécanique la plus déterminante pour le choix des types de matériaux constituant les murs d'un bâtiment. Cet essai mécanique permet de déterminer deux types de résistances, la résistance à la compression sèche et la résistance à la compression humide. L'essai de la résistance à la compression humide est identique à celui de la résistance à la compression sèche, excepté le fait que les échantillons seront au préalable immergés totalement dans de l'eau durant deux heures ou quelques minutes ; retirer le bloc de l'eau et l'essuyer avec un linge humide avant de subir la charge de la presse pour en apprécier la nouvelle résistance mécanique. La figure 20a en annexe 2 présente le dispositif de l'essai.

4. CARACTERISATION DES PROPRIÉTÉS HYGROTHERMIQUES

L'effusivité thermique, la capacité thermique, la diffusivité thermique, la conductivité thermique et la profondeur de pénétration sont les principales propriétés thermiques mesurées sur les échantillons de briques en terre comprimée sur cette étude. Elles sont déterminées à l'aide du dispositif DEsProTherm (Dispositif d'estimation des propriétés thermiques) présenté en annexe 2 (Figure 21b). La mesure de l'effusivité thermique (E) est effectuée sur des échantillons de taille unique ($6 \times 4 \times 3 \text{ cm}^3$) secs et humides. Ces dimensions permettent de recouvrir complètement la cellule de mesure et de s'assurer que le flux de chaleur ne traverse pas l'échantillon en expérimentation, et d'en limiter les pertes. Cette condition permet de s'assurer de la qualité des mesures, en plus des différentes corrections apportées par le logiciel de traitement. Par ailleurs, la mesure de la capacité calorifique, équivalente de la chaleur spécifique (C_p) se fait sur des échantillons ($6 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$) permettant au flux de chaleur cette fois-ci de traverser l'échantillon. Une fois ces deux paramètres obtenus, la conductivité thermique et la diffusivité thermique sont ensuite déterminées en utilisant respectivement les équations 3 et 7.

5. CONCLUSIONS

Ce chapitre avait pour objectif de présenter dans un premier temps les matériaux, les matériels et les méthodes utilisées, ainsi que les essais réalisés sur les échantillons, puis chercher à comprendre l'influence de la nature d'argile et matériau de substitution sur les propriétés thermiques, hydromécaniques et les propriétés de durabilités. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les principaux résultats obtenus, les interpréter et les discuter. Cette étape rentre dans le cadre de nos objectifs fixés dès le départ de cette étude.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION

Dans cette partie nous aborderons les résultats des tests réalisés pendant la période de stage et nous analyserons les résultats obtenus. La plupart des études et expérimentations ont eu pour objectif la détermination des propriétés thermiques, mécanique, et durabilité des BTC. On analysera l'influence de l'ajout de sous-produit agro-alimentaire sur le matériau argileux issu de la carrière de Kamboinsé. Les échantillons utilisés pour ces tests ont subi une maturation à la température ambiante du laboratoire (30 ± 5 °C). Cela signifie qu'ils ont été placés en milieu hermétique afin de conserver autant que possible la teneur en eau à la formulation, mais soumis à des variations de température au cours de la journée. Il y a d'autres échantillons qui, n'ayant subi aucune maturation (c'est à dire exposées à l'air libre), ont été aussi testés.

2. LES PROPRIETES PHYSIQUES ET HYDROMECHANIQUES DES BTC

2.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION SECHE

La Figure 3 présente les différentes résistances observées à la compression sèche pour les différentes teneurs en liant. Les échantillons stabilisés au ciment servent de référence. Elles présentent une résistance moyenne à la compression sèche élevée de 7.60 MPa, car le ciment Portland possède des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux, soit celle de l'hydratation par cimentation. D'après RAOUF (2015) lorsque le ciment Portland est hydraté, en plus du silicates de calcium hydratés (CSH), il forme également l'hydrate d'alumine calcique (CAH) et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ le CSH et le CAH forment un réseau servant de liant donnant une structure et de la résistance au mélange. Les échantillons non stabilisés et ceux stabilisés au CCR présentent une résistance moindre. Mais les échantillons stabilisés à 15% de CCR et mûré à 45 jours, présentent une résistance moyenne à la compression de 4.60 MPa comparés à 1.2 MPa pour l'échantillon non stabilisé. Cette amélioration du comportement mécanique est due à l'augmentation du potentiel de réaction pouzzolanique apporté par la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contenu dans le CCR avec la terre. La présence de silice permet la réaction avec la chaux en milieu basique pour donner des silicates de calcium hydratés. On pouvait s'attendre à un tel résultat du fait que le matériau argiles de Kamboinsé est composée principalement de Kaolinite de (76%), du quartz (11%) et de la goethite (9%). Et le rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vaut 2.13. Or pour qu'une terre réagisse convenablement avec un élément alcalin comme la chaux, la

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

fraction $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ doit être inférieure à 4 selon KOUAMO (2013), ce qui est le cas de la terre de Kamboinsé. Avec 15% de CCR, tous les réactifs du côté de la terre ont été consommés.

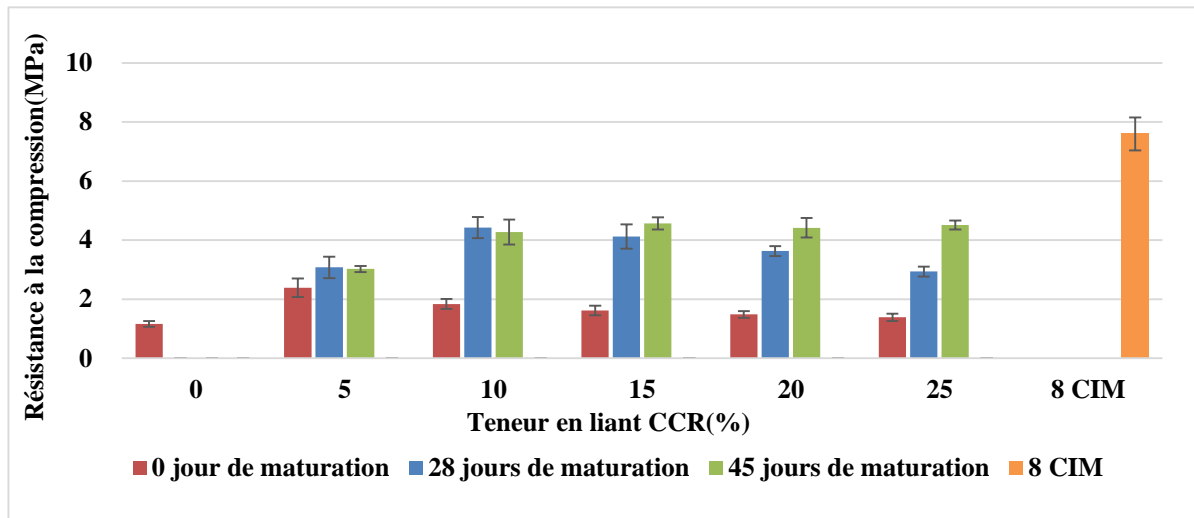


Figure 3 : Résistance à la compression sèche maturé à 0 jour, 45 jours en fonction de CCR

Les échantillons stabilisés à 10% de CCR et maturée à 28 jours ont une résistance moyenne de 4.40 MPa, comparé à ceux stabilisés à 15% de CCR et maturée à 45 jours dont la valeur moyenne de résistance est de 4.60 MPa. Nous rappelons que l'ajout de chaux à la terre argileuse induit principalement deux réactions: une réaction à court terme (échange cationique et floculation) et une réaction à long terme (réaction pouzzolanique) entraînant une solidification du matériau. Cette réaction produisant les silicates de calcium hydratés a déjà eu lieu avec les argiles, qui apportent une certaine quantité d'alumines et de silice. Nous pouvons dire qu'au-delà de 28 jours de maturation, la réaction pouzzolanique évolue un peu, ce qui contribue à l'augmentation de la résistance. Mais les échantillons à 0 jour de maturation présentent une résistance moindre que les autres. Mais au-delà de la teneur optimum en chaux, on observe une décroissance des résistances avec des concentrations de chaux trop importantes selon IZEMOURREN, GADRI et al (2013). C'est le cas des échantillons à 20% CCR. D'après les études antérieures, la plupart des normes prennent en compte la résistance minimale à la compression à sèche de 2 MPa. WALKER (1995) a produit des BTC stabilisées avec 5 à 10% de ciment et a obtenu une résistance à la compression de 3,5 à 7 MPa. Les résistances à la compression à sec similaires de 3,5 à 8 MPa ont été observées par NAMANGO (2006), avec des BTC stabilisées à 12% de ciment. La norme africaine ARS 674 divisait les briques en terre comprimée en deux catégories : les briques en terre comprimée avec une résistance à la compression comprise entre 2 et 4 MPa, utilisées pour les murs non porteurs, et celles ayant

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

une résistance à la compression supérieure à 4 MPa, pour un mur porteur. Selon cette norme, nos BTC stabilisée à 8% de ciment, 10 % de CCR, 15% de CCR, 20% de CCR et 25% de CCR pourrait être utilisé comme mur porteur et celle stabilisée à 5 % CCR pourrait être utilisé comme mur non porteur et celle non stabilisée ne respecte pas cette norme.

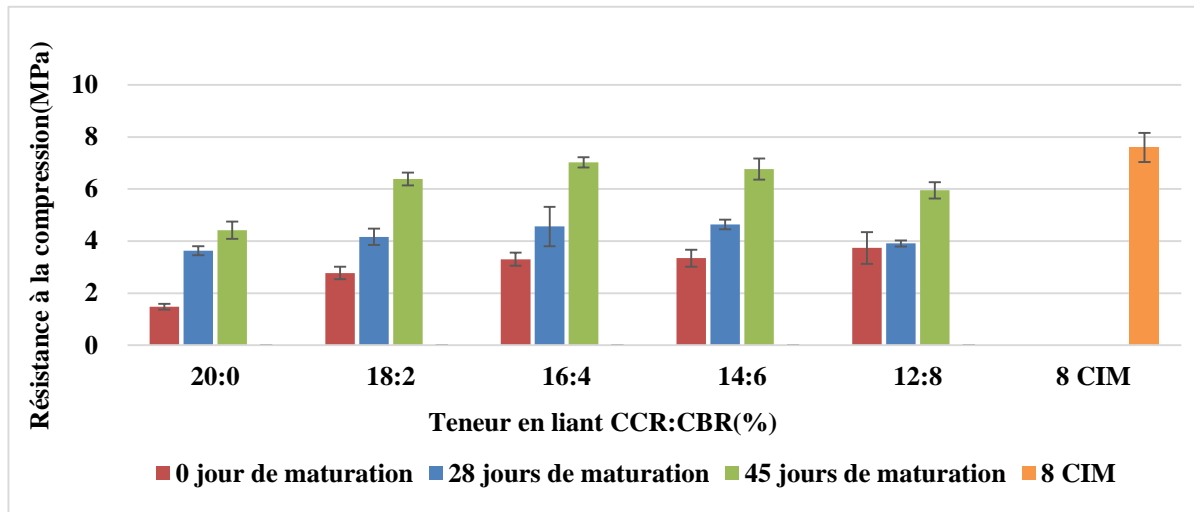


Figure 4 : Résistance à la compression sèche mûré à 0 jour, 28 jours et 45 jours en fonction de CCR:CBR

La Figure 4 présente les différentes résistances observées à la compression pour les différents teneurs en liant de CCR et CBR. Nous remarquons qu'au fur et à mesure que le temps de maturation augmente la résistance augmente. L'optimum est atteint chez les échantillons stabilisés à 16:4 de CCR:CBR avec une résistance de 7 MPa à 45 jours de maturation, cela est dû à la présence de pouzzolane de Cendres de Balle de Riz (CBR), par rapport aux échantillons stabilisés au ciment qui ont une valeur de 7.60 MPa. La présence de CBR dans le mélange favorise une plus grande réaction pouzzolanique avec le CCR, ce qui améliore encore la résistance à la compression, car le CBR contribue aussi au renforcement de la stabilisation à la chaux en augmentant légèrement la résistance à long terme. HORPIBULSUK, PHETCHUAY et al (2013) ont signalé un comportement similaire lors de la stabilisation d'un sol limoneux avec CCR et cendres volantes, et lors de son étude il a indiqué que les BTC stabilisés avec 9:1% de CCR:CBR ont atteint une résistance à la compression supérieure à 4 MPa.

2.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION HUMIDE

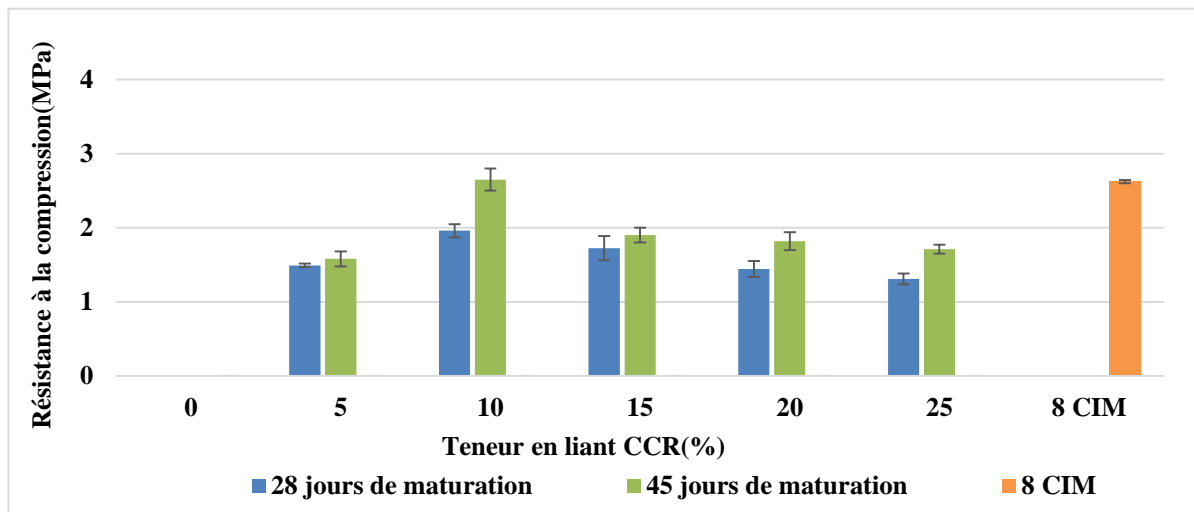


Figure 5 : Résistance à la compression humide après 28 jours de maturation et 45 jours de maturation en fonction de CCR

La figure 5 présente les différentes résistances à la compression humide observée pour les différentes teneurs en liant. On constate que les échantillons stabilisés au ciment ont une valeur maximal de la résistance à la compression de 2.62 MPa, que ceux stabilisés CCR, la valeur maximal de la résistance compression de 2.65. Cette baisse de résistance est normale car avec une teneur en eau plus élevée, les argiles se liquéfient et perdent leur cohésion, elle pourrait s'expliquer par le fait que l'eau s'infiltré dans les pores de l'échantillon et tend à écarter les particules, ce qui crée des zones de fragilité. Mais notons que ces conditions (d'immersion totale durant deux heures) ne sont rencontrées en réalité que dans des cas d'inondation. Toutes les BTC stabilisées au CCR et maturées à température ambiante seraient de la classe BTC 40 et BTC 60. Les études précédentes ont montré qu'avec les BTC stabilisé avec 5 à 10% de ciment WALKER (1995) a obtenu une résistance à la compression humide de 2 à 4 MPa. Les résultats des BTC non stabilisées n'y figurent pas du fait qu'elles ne tiennent pas en immersion (elles se désagrègent).

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

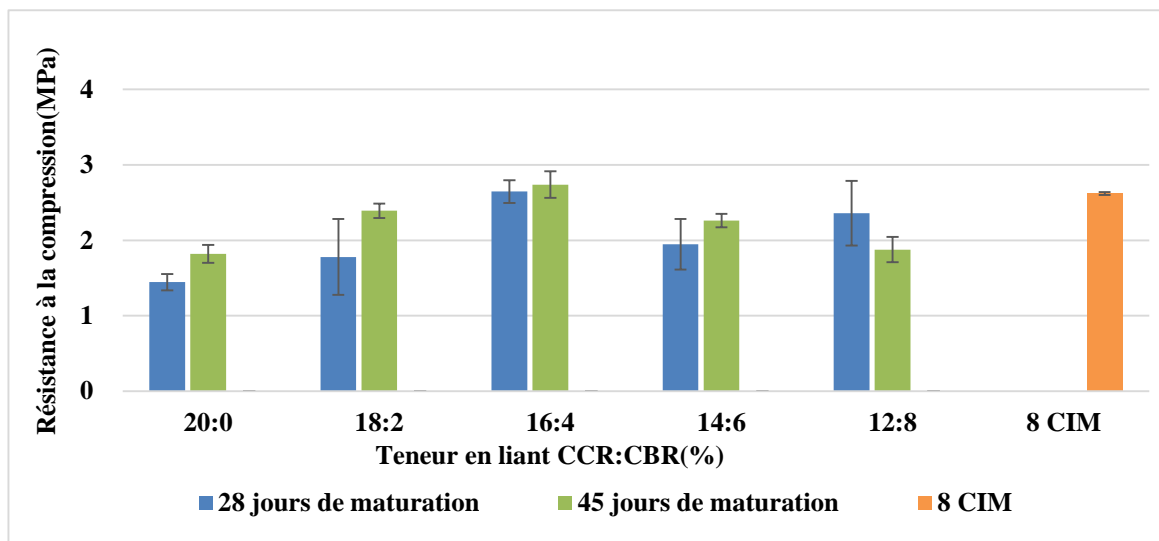


Figure 6 : Résistance à la compression humide après 28 jours de maturation et 45 jours de maturation en fonction de CCR:CBR

La figure 6 présente les différentes résistances à la compression observée pour les différents teneurs en liant. On constate que les échantillons stabilisés par CCR seul présentent une résistance moindre que ceux stabilisés au CCR:CBR et au ciment. Les BTC stabilisées au CCR:CBR et maturées à 45 jours présente une valeur supérieure par rapport aux échantillons maturés à 28 jours, Parmi ceux maturés à 45 jours, l'optimum est observé à 2.74 MPa chez les échantillons stabilisés à 16:4 de CCR:CBR. BOGAS (2108), NAGARAJ et al (2014) ont signalé un gain de résistance des BTC à long terme lorsque la chaux était utilisée en association avec du ciment. Comparativement aux échantillons stabilisés au ciment qui présentent une résistance moyenne à la compression de 2.62 MPa. Cette baisse de résistance est normale, elle pourrait être expliquée par le fait que l'eau s'infiltré dans les pores de la BTC et tend à écarté les particules ce qui crée des zones de fragilité.

2.3 DENSITE APPARENT

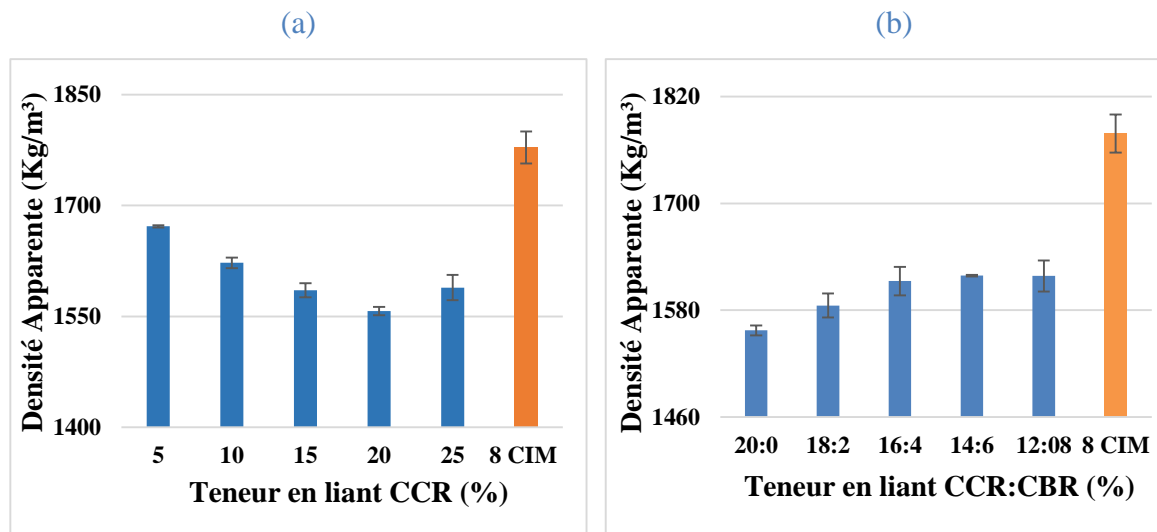


Figure 7 : Densité Apparente des BTC en fonction (a) de CCR et (b) CCR:CBR

On remarque une tendance décroissante de la densité apparente de ($1670 - 1590 \text{ kg.m}^{-3}$) avec l'augmentation la teneur en CCR (Figure 7a). Cette tendance s'explique par le fait que le CCR, moins dense, remplace quelques grains solides dans la matrice du sol. L'effet de la densité sur la résistance n'est pas flagrant quand on compare les résultats des résistances sèches à celle de la densité. Car les échantillons plus denses ne sont pas systématiquement plus résistants, par exemple les échantillons non stabilisés à 0 % de CCR ont une faible résistance (1,2 MPa) mais une valeur de densité élevée (1672 kg.m^{-3}), or ceux stabilisés à 15 % de CCR, présentent une valeur de résistance de (4,60 MPa) et une faible densité (1558 kg.m^{-3}). Certains échantillons stabilisés au CCR sont moins denses mais plus résistants, cela peut être un gain pour l'aspect structural.

Mais on remarque une tendance croissante de la densité apparente de ($1557 \text{ à } 1618 \text{ kg.m}^{-3}$) chez les échantillons stabilisés au CCR:CBR, et à partir de 14:6 % de CCR:CBR la densité tend se stabiliser (Figure 7b). Par exemple les échantillons stabilisés à 14:6 % de CCR:CBR ont une valeur élevée de densité (1613 kg.m^{-3}) et une résistance de 7 MPa, la valeur d'une telle résistance peut être expliquée par la présence d'une teneur en argile et silt élevée et la taille des petits grains dans le matériau. La densité est l'un des principaux paramètres physiques qui influent sur les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Tableau V : propriétés Physiques et hydromécanique

	Echantil lons	Résistances sèche(Rcs) (MPa)		Résistances humide (Rch) (MPa)		Densité (kg/m ³)	Coefficient structurale (Cfs) (J/kg)		Coefficient de résistance (Cfe) à l'eau	
		Rcs à 28 jours	Rcs à 45 jours	Rch à 28 jours	Rch à 45 jours		Cfs à 28 jours	Cfs à 45 jours	Cfe à 28 jours	Cfe à 45 jours
CCR (%)	5	3.10	3.01	1.49	1.58	1672	1842	1808	0.48	0.52
	10	4.41	4.31	1.96	2.65	1622	2729	2632	0.44	0.62
	15	4.10	4.63	1.72	1.90	1585	2601	2879	0.42	0.42
	20	3.60	4.42	1.44	1.82	1557	2331	2837	0.40	0.41
	25	2.90	4.53	1.31	1.71	1589	1848	2838	0.45	0.38
CCR: CBR (%)	20:0	4.4	3.6	1.41	1.82	1557	2331	2837	0.40	0.14
	18:2	6.4	4.2	1.83	2.39	1585	2626	4028	0.43	0.37
	16:4	7.0	4.6	2.65	2.74	1613	2827	4357	0.58	0.39
	14:6	6.8	4.6	1.90	2.26	1619	2868	4182	0.42	0.33
	12:8	6.0	3.9	2.42	1.88	1618	2415	3678	0.60	0.32
CIM	8%	7.60		2.63		1726	4402		0.35	

Les caractéristiques des propriétés physiques et hydromécaniques sont recensées dans le tableau V. La norme AFNOR fixe la valeur limite de coefficient de résistance à l'eau à 0.5, certains de nos échantillons ont respecté cette norme, mais la plupart des valeurs obtenues dans le présent travail sont bien au-dessous de cette valeur limite. BOGAS (2018), a signalé que WALKER et BAHAR (1995) ont obtenu des coefficients de résistance à l'eau de 0,49 à 0,53. Ce coefficient permet de caractériser la stabilité des BTC face à l'eau.

3. LA DURABILITE DES BRIQUES EN TERRE COMPRIMEE

3.1 RESISTANCE A L'ABRASION

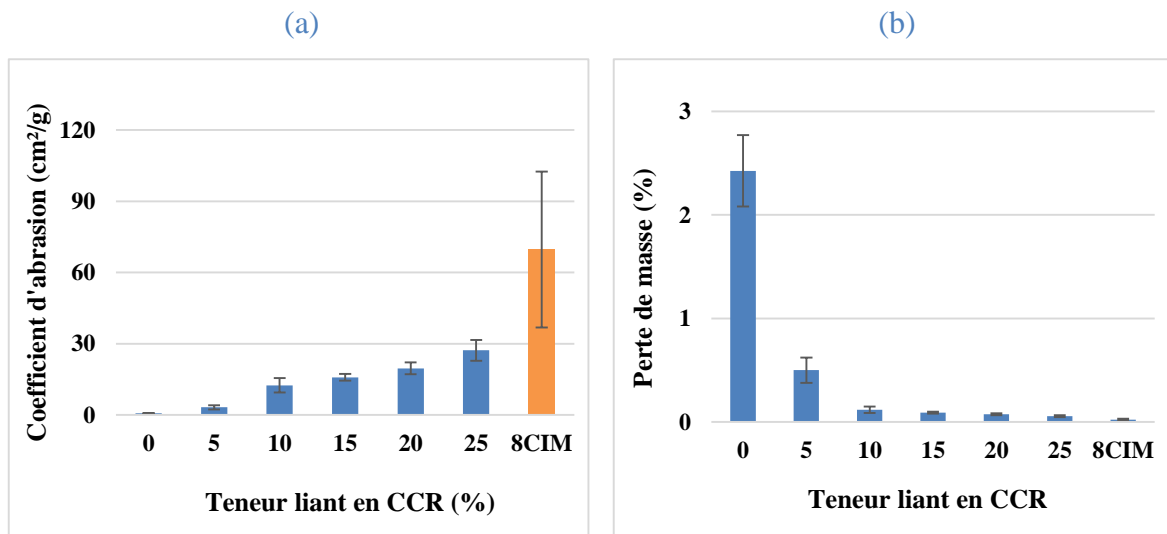


Figure 8: Evolution de la résistance à l'abrasion (a) coefficient d'abrasion, (b) perte de masse par abrasion en fonction du CCR.

La figure 8 nous présente la résistance à l'abrasion des BTC avec liant CCR, nous observons que le coefficient d'abrasion croît au fur et à mesure que la teneur en liant augmente de 1 à 27 cm².g⁻¹ pour des teneurs en liant de 0 à 25 % (Figure 8a). Les échantillons stabilisés au ciment présentent un coefficient moyen à l'abrasion élevée de 70 cm².g⁻¹, ceux non stabilisés au CCR présentent un coefficient moindre de 1 cm².g⁻¹. Mais la perte de masse décroît de 2.4% à 0.1% au fur et à mesure que la teneur en liant augmente (Figure 8b).

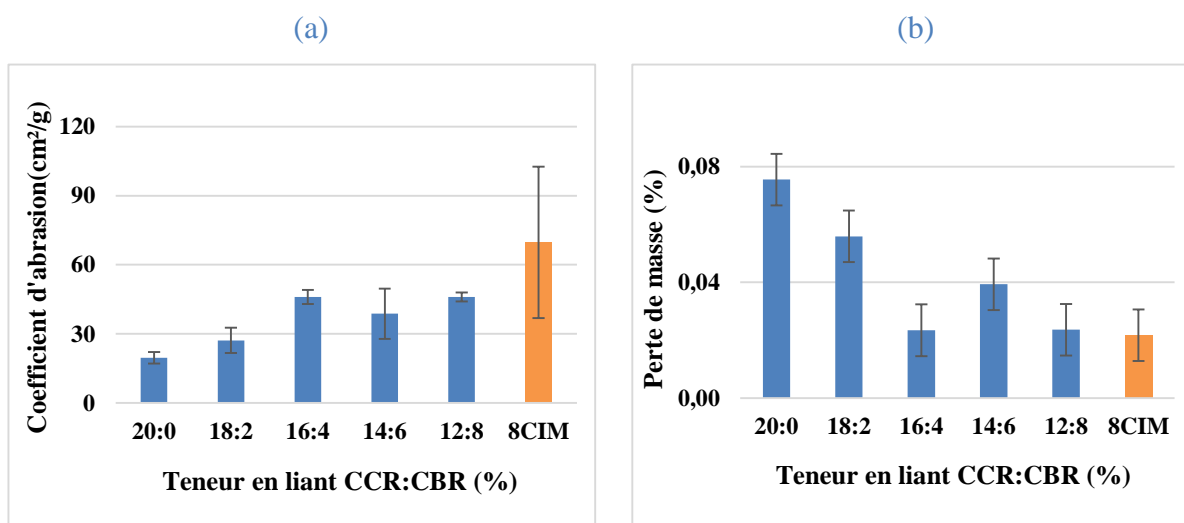


Figure 9 : Evolution de la résistance à l'abrasion (a) coefficient d'abrasion, (b) perte de masse par abrasion en fonction du CCR:CBR

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Nous observons au niveau de la figure 9 que le coefficient d'abrasion des BTC stabilisées avec le liant CCR et CBR, et ce coefficient d'abrasion croit de $20 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ à $70 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$, mais la perte de masse décroît au fur et à mesure que la teneur en liant augmente de 0,08 pour les échantillons non stabilisés à 0,02 pour les échantillons stabilisés au CCR.

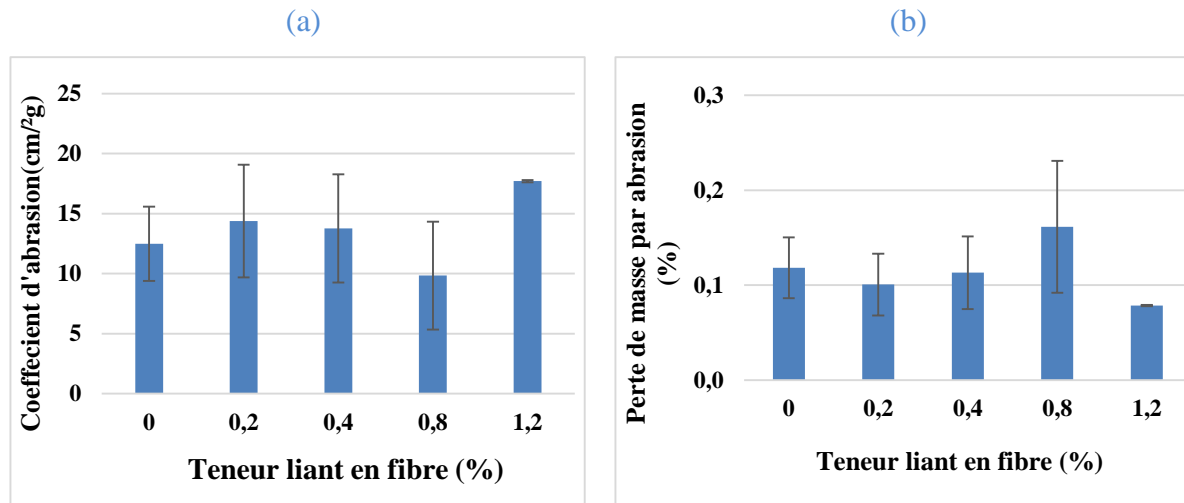


Figure 10 : Evolution de la résistance à l'abrasion (a) coefficient d'abrasion, (b) perte de masse par abrasion en fonction de fibres.

La figure 10 présente le coefficient d'abrasion des BTC stabilisées avec des fibres, ce coefficient d'abrasion croit de $12 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ à $18 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ au fur et à mesure que la teneur en fibre augmente, mais la perte de masse maximale est atteinte avec les échantillons stabilisés à 8% de fibre. Le Coefficient d'abrasion (Ca) est l'un des paramètres de durabilités des BTC, la norme XP P13-901 d'AFNOR de 2001 a fixé des valeurs limites de coefficients d'abrasion (Ca). Elle est de 2 pour les BTC 20, de 5 pour les BTC 40 et de 7 pour les BTC 60. En deçà, la brique serait trop sensible à l'abrasion, ce qui n'est pas acceptable. La norme ARS 675, 1996 propose que la perte de masse soit inférieure 10 %. Le Tableau VI présente les valeurs des coefficients d'abrasion de cette étude.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Tableau VI : Tableau récapitulative de classification de coefficient d'abrasion Ca (cm²/g) et la Profondeurs d'érosion (mm) en fonction de l'indice d'érosion

Echantillons		coefficients d'abrasion Ca (cm ² /g)	Classement (XP P13-901, 2001)	Profondeur d'érosion (PrfE) mesurée (mm/h)	Profondeur d'érosion (PrfE) recommandée (mm/h)	Indice d'érosion	Classement
CCR(%)	0	1	Trop sensible à l'abrasion	140	$120 \leq \text{PrfE}$	5	À rejeter
	5	3	BTC 40	7	$0 \leq \text{PrfE} \leq 20$	1	Peu érodable
	10	13	BTC 60	5			
	15	16	BTC 60	5			
	20	20	BTC 60	5			
	25	27	BTC 60	4			
	8% CIM	70	BTC 60	3			
CCR:CBR (%)	20 :0	20	BTC 60	5	$0 \leq \text{PrfE} \leq 20$	1	Peu érodable
	18 :2	27	BTC 60	5			
	16 :4	46	BTC 60	5			
	14 :6	39	BTC 60	5			
	12 :8	46	BTC 60	7			
FIBRE(%)	0.0	12	BTC 60	5	$0 \leq \text{PrfE} \leq 20$	1	Peu érodable
	0.2	14	BTC 60	6			
	0.4	14	BTC 60	10			
	0.8	10	BTC 60	7			
	1.2	18	BTC 60	7			

3.2 RESISTANCE A L'ERODABILITE

Les figures 11, 12 et 13 présentent les différentes résistances à l'érodabilité observées par les différentes teneurs en liant. Ainsi que les surfaces érodées observées.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

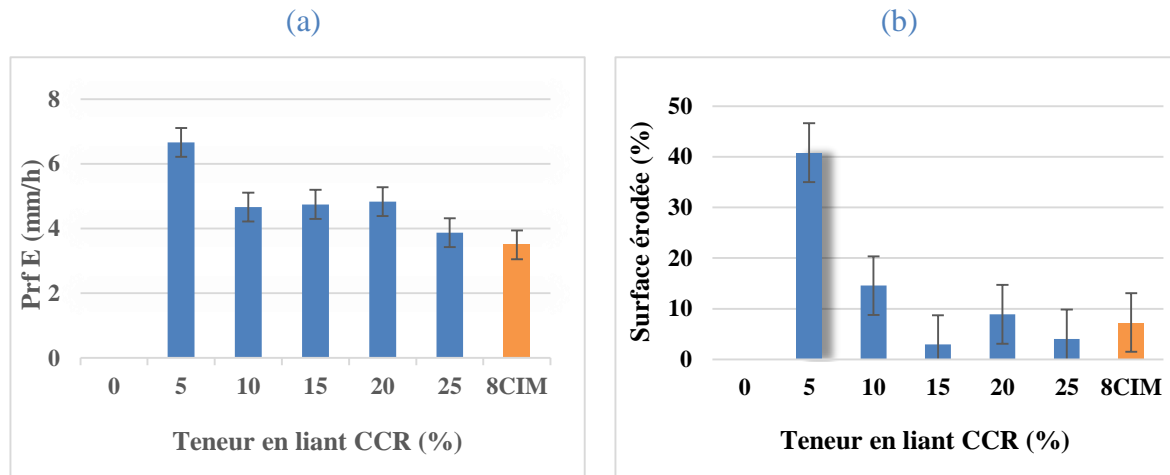


Figure 11 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion, (b) surface érodée en fonction de CCR

La figure 11 présente la résistance à l'érodabilité, les BTC non stabilisée n'ont pas pu résister à la pression d'eau. Au fur et à mesure que la teneur en liant CCR augmente, certaines BTC ont pu résister au test d'érodabilité et la profondeur d'érosion maximale est 7 mm.h^{-1} pour celle des BTC stabilisée à 5 % de CCR. De 10% de CCR à 20% de CCR la profondeur d'érosion est constante (5 mm.h^{-1}) ainsi que celle de 25% CCR à 8% CIM (4 mm.h^{-1}). La surface des BTC non stabilisée a été complètement détruite, mais les BTC stabilisées à 15 % CCR présentent seulement une surface érodée de 3%. Néanmoins, les BTC stabilisées à 20 % ont une surface érodée plus élevée (9%), cela peut être dû que certaines BTC présentent des zones de fragilité pendant leur fabrication et cela peut influencer la surface érodée.

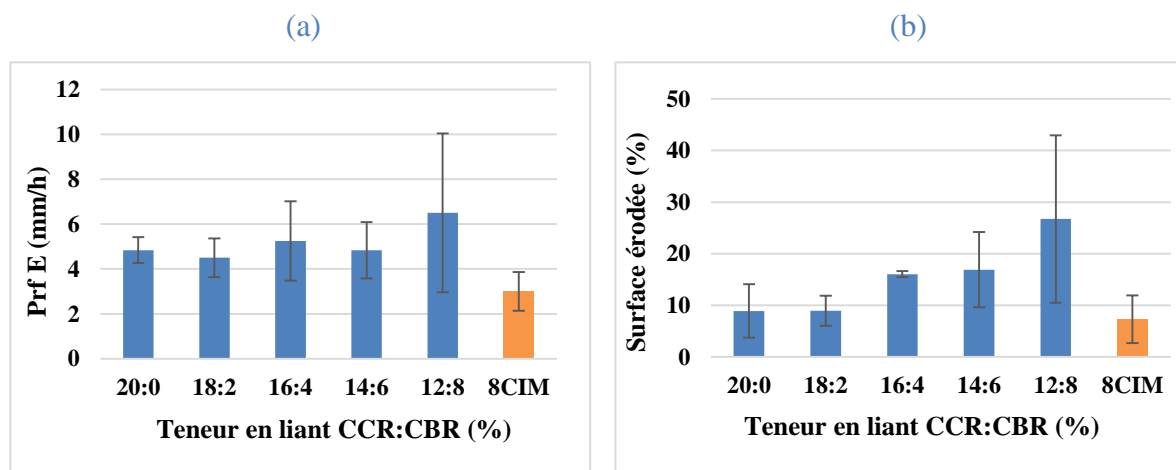


Figure 12 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion (Prf E), (b) surface érodée en fonction CCR:CBR

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

La figure 12 présente la résistance à l'érodabilité des échantillons stabilisés au CCR:CBR, la valeur de la profondeur d'érosion varie en fonction de la quantité de la teneur en liant, la profondeur maximale d'érosion est de 6.5 mm.h^{-1} pour les BTC stabilisés à 12:8 % de CCR:CBR, ainsi qu'elles présentent une surface érodée de 27 % que les autres. Mais celle stabilisées au ciment ont une surface érodée moins que les autres (3 mm.h^{-1}) ainsi que la profondeur d'érosion (10%).

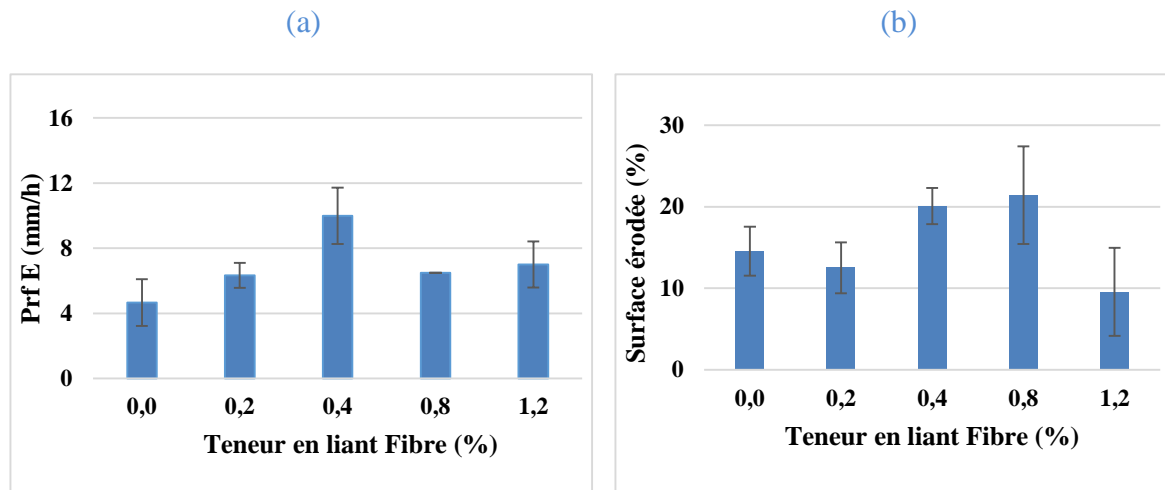


Figure 13 : Evolution de la résistance à l'érodabilité (a) profondeur d'érosion (Prf E), (b) surface érodée en fonction des fibres

On remarque que les échantillons non stabilisés présentent une valeur minimale de profondeur d'érosion de 5 mm/h que les autres, avec une surface érodée de 15 %. On constate que la présence massive des fibres dans certaines zones crée des zones de fragilité. Dans les études précédentes CID-FALCETO, MACARON et al (2012), ont utilisé une pression d'eau de 50 kPa à une distance de 470 mm, mais l'auteur n'a signalé aucune érosion des BTC stabilisé. Mais les BTC non stabilisés ont été complètement détruite. GUETTALA et al (2006) pendant leurs travaux de recherche ont exposé des murs construit en BTC et stabilisé à 8% et à 12% chaux à des conditions réels d'usage pendant 48 mois, et ils ont constaté que les murs construits en BTC stabilisé à 8 % de chaux ont montré une légère dégradation d'une profondeur de 1 mm, avec une surface érodée de 40 %. Mais les murs construits en BTC stabilisés à 12% n'ont présentés aucun signe d'érosion. BOGAS (2018) avait signalé qu'OBOYON, EXELBRIT et al (2010) ont obtenues les profondeurs d'érosion de 0.78 mm.h^{-1} avec des BTC stabilisés à 7 % de ciment soumis à une pression de pulvérisation de 4000 kPa. Selon le classement de la norme (XP P13-901 AFNOR 2001) $0 \leq \text{PrfE} \leq 20$, les échantillons stabilisés sont peu érodables et ont une profondeur d'érosion de 1 mm.h^{-1} .

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

Le tableau récapitulatif VI ci-dessus résume les valeurs des échantillons non stabilisés et stabilisés, classé en fonction de la valeur de l'indice d'érosion (1 à 5) selon la norme NZS 4298 1998. Et cette norme dit que les échantillons ayant un indice d'érosion de 1 à 4 sont peu érodable mais à partir de 5 vers le haut l'échantillon est trop sensible à l'érosion.

4. PROPRIÉTÉS THERMIQUES

Les performances thermiques des BTC sont importantes pour le confort intérieur de la construction. Si l'ajout de matériaux alternatifs stabilisants permet d'améliorer aussi les capacités thermiques, le défi est gagné. On évalue ici la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la profondeur de pénétration des flux de chaleur pour une période de 24 heures.

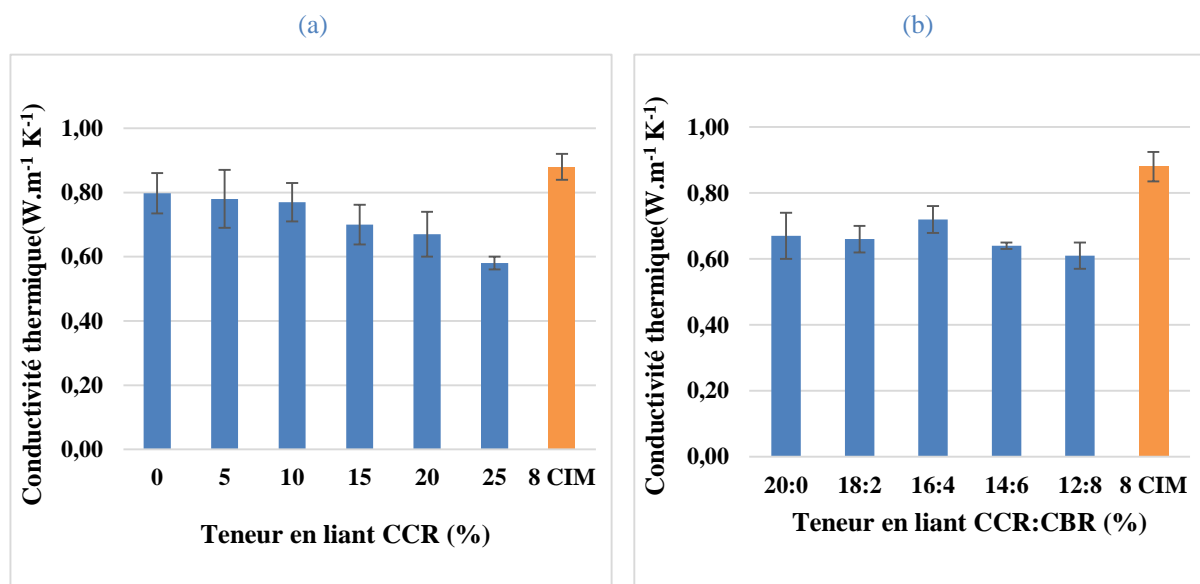


Figure 14 : Conductivité thermique des BTC en fonction de la teneur en (a) CCR et (b) CCR:CBR.

Les échantillons non stabilisés présentent une conductivité moyenne de $0,80 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ alors que ceux ayant été stabilisés au ciment ont une valeur de $0,88 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, ceux stabilisée aux CCR, ont des conductivités qui varient de $0,78$ à $0,58 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, la présence de chaux permet de diminuer la conductivité thermique. Mais ceux stabilisés aux CCR:CBR ont une valeur qui varie de $0,80$ à $0,61 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Du point de vue du comportement thermique la meilleure formulation est celle de 25 % de CCR qui correspond à la diminution de la conductivité de $0,58\%$. Un dosage en chaux plus important semblerait contribuer positivement à la baisse de conductivité thermique. On remarque dans le tableau V que l'échantillon stabilisé à 25 % de CCR présente une densité un peu faible, et par conséquent, sa conductivité thermique est également faible. Car l'objectif est d'atteindre une conductivité la plus faible qui caractérise le pouvoir d'isolant thermique du matériau. REAL et al (2016) ont mesuré la conductivité

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

thermique (λ), dans une plage comprise entre 0,015 et 0,7 $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, avec une erreur maximale de $5\% \pm 0,001 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, mais cet essai a été mesuré à 28 jours avec un analyseur de transfert de chaleur portable ISOMET 2114, utilisant une sonde de mesure de surface pour matériaux durs. Elle a été déterminée au moyen d'une méthode dynamique à impulsions transitoires, dans laquelle un flux de chaleur est généré en appliquant une impulsion de chaleur au spécimen en équilibre thermique avec le milieu environnant. BOFFOUE et al (2015), ont observé que la conductivité thermique augmente pour des teneurs de ciment variant entre 5% et 15%. Pour ces teneurs en ciment, la conductivité thermique varie de 0,54 à 1,18 $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

SORE (2017), avec des BTC stabilisée au géopolymère a obtenu des valeurs allant jusqu'à 0,71 $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les valeurs les plus faibles.

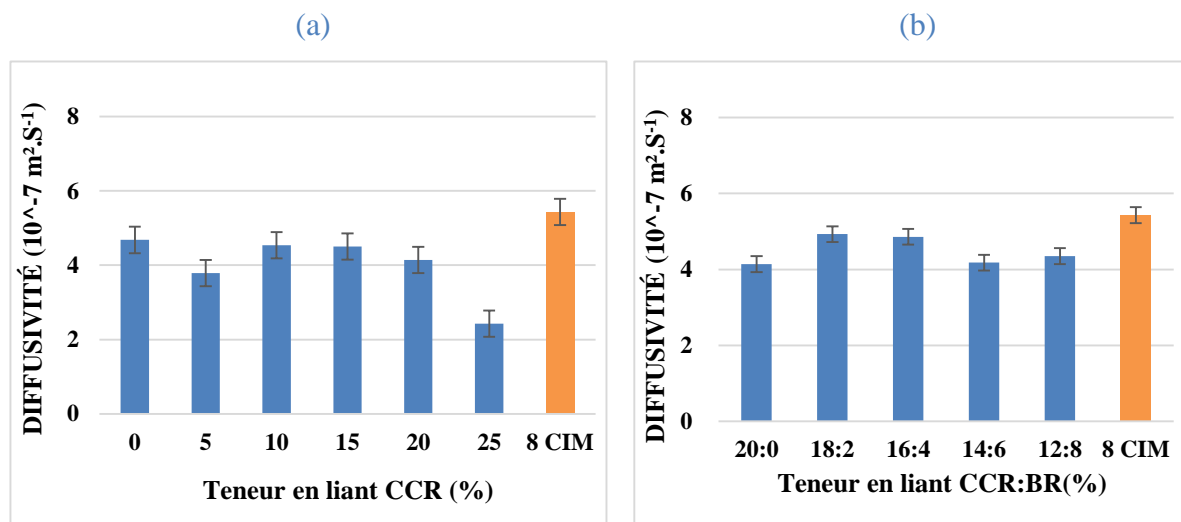


Figure 15: Valeurs de Diffusivité selon les formules des BTC (a) en fonction de CCR et (b) en fonction de CCR:CBR

La diffusivité thermique, diminue au fur et à mesure que la teneur en liant augmente. La plus faible valeur des échantillons stabilisés à 25% de CCR est de $2.43 \cdot 10^{-7} \text{m}^2.\text{S}^{-1}$, celles stabilisés aux CCR:CBR (16 :4%) est de $4.18 \cdot 10^{-7} \text{m}^2.\text{S}^{-1}$, la valeur maximale est atteinte avec les échantillons stabilisés à 8% de ciments ($5.43 \cdot 10^{-7} \text{m}^2.\text{S}^{-1}$), plus la valeur de la diffusivité est faible, plus le temps mis par l'onde calorifique pour traverser le matériau est long, c'est le déphasage thermique. Les échantillons stabilisés à 25 % de CCR présente une valeur satisfaisante qui en fait un avantage pour le confort thermique.

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

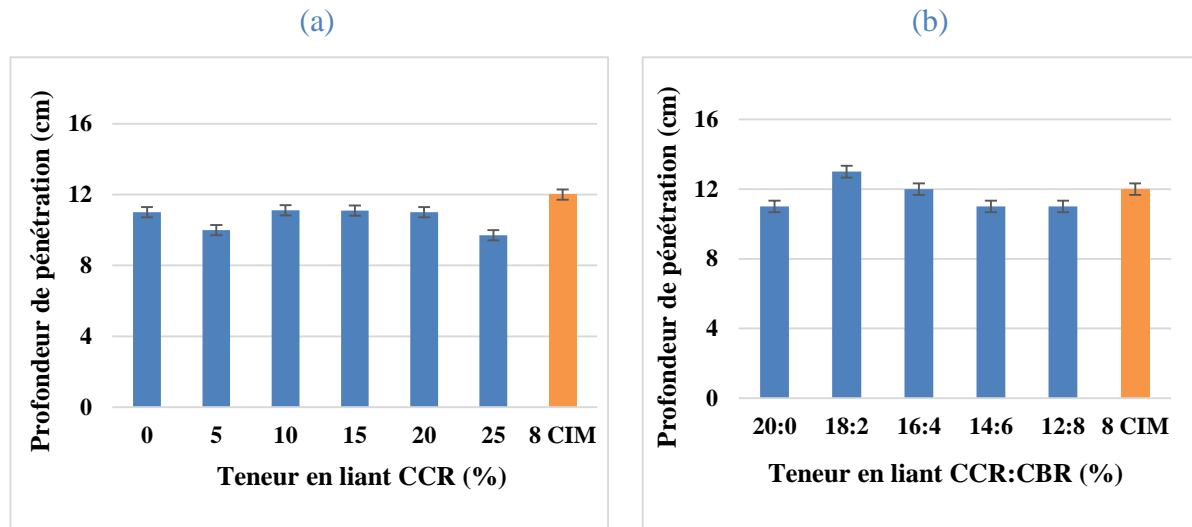


Figure 16 : Profondeur de pénétration de chaleur

Les valeurs de la profondeur de pénétration de chaleur des BTC stabilisés au CCR et au CCR:CBR sont proches, car l'écart-type ne varie pas trop excepté les échantillons stabilisés au ciment. Les échantillons stabilisés à 25% et 0% de CCR ont une valeur maximale de profondeur de chaleur de 10 à 11cm, ce résultat peut expliquer par la présence des petits grains ou l'homogénéité que le matériau présent, car au fur et à mesure que la teneur en liant augment les pores de nos matériaux devient de plus en plus saturée de CCR. Par contre les échantillons stabilisés à 12:8% de CCR:CBR ont une profondeur de pénétration de chaleur de 11cm. Par rapport à ceux stabilisés au ciment qui ont une valeur de 12cm. Or SEINI MOUSSA (2019), a obtenu une profondeur de pénétration de chaleur de 11cm et 13cm avec les BTC stabilisées à 25% CCR et 0% CCR.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de présenter, discuter et interpréter les résultats des expérimentations de mesure des paramètres d'usage des BTC. Le matériau argileux utilisé à une forte proportion en kaolinite et en quartz à hauteur de 76%, le CCR est riche en portlandite (chaux éteinte) à hauteur de 67%, ainsi que le CBR contient 68% de silice. Les BTC stabilisées à 15% CCR présentent de bonnes caractéristiques hydromécaniques, thermiques ainsi que la durabilité, que les BTC non stabilisées, cela est due à la présence massive de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui est le responsable de la réactivité du CCR. Ainsi que les BTC stabilisés à 16:8% de CCR:CBR offrent de bonnes performances du point de vue du confort thermique,

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

durabilité et les performances hydromécaniques. En plus, les liants utilisés sont des sous-produits agro industriels disponible au Burkina Faso qui pourraient être valorisé.

V. CONCLUSION GENERAL

L'objectif général de ce travail s'inscrit dans une thématique de l'amélioration de la qualité de l'habitat en terre crue au Burkina Faso. Nous nous sommes intéressés, dans ce mémoire, à la détermination des propriétés hygrothermiques et durabilité des briques de terre comprimées (BTC) stabilisées par les sous-produits agro-industriels, en utilisant les matériaux locaux : la terre de Kamboinsé, le Carbure de Calcium Résiduel (CCR) et la Cendre de la Balle du Riz (CBR). Les objectifs spécifiques de l'étude étaient axés spécifiquement sur :

1. La détermination des propriétés thermiques des BTC stabilisées,
2. L'étude des performances hydromécaniques des BTC,
3. L'étude de la durabilité des BTC stabilisée dans le contexte d'usage.

Pour cela, une étude a été menée et les conclusions sont les suivants :

○ Sur le plan thermique des BTC stabilisées,

Sur le plan thermique, les briques stabilisés à 25% de de Carbure de Calcium Résiduel (CCR) affichent des performances thermiques satisfaisantes, elles ont une conductivité de $0,58 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, une diffusivité thermique de $2.43 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.\text{S}^{-1}$ et une profondeur de pénétration de chaleur de 10 cm, par rapport à celles des briques stabilisées avec la Cendre de Balle du Riz et carbure de calcium résiduel (CCR:CBR) qui ont une conductivité de $0.61 \text{ W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, une diffusivité thermique de $4.18 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.\text{S}^{-1}$ et une profondeur de pénétration de chaleur de 11 cm, ainsi que ceux stabilisées au ciment. La baisse de la conductivité thermique est peut-être due à la présence du liant CCR incorporer dans le matériau terre. Car l'objectif est d'atteindre une conductivité la plus faible. Cela constitue donc un atout pour l'utilisation de ce type de matériau dans la construction durable. Si l'on se fixe comme critères de choix du matériau de construction les performances thermiques, des BTC stabilisées à 25% de carbure de calcium résiduel seraient idéales.

○ Performances hydromécaniques des BTC stabilisées,

Les essais réalisés sur les BTC indiquent que l'ajout de CCR comme matériaux alternatifs a contribué à une amélioration significative des comportements mécanique allant de 3,1 MPa pour une cure de 28 jours à 4,60 MPa pour une cure de 45 jours, pour la résistance en compression sèche, et de 1,96 MPa à 2,65 MPa, pour la résistance humide. Les balles de riz

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

calcinées ont contribué au renforcement de la stabilisation à la chaux en augmentant la résistance à long terme (à 28 jours la résistance sèche est de 4.60 MPa et 2.60 MPa pour la résistance humide, à 45 jours elle est de 7.0 MPa à 2.74 MPa). L'ajout de CCR plus CBR a permis d'atteindre des valeurs de résistances plus élevées que quand on utilise le CCR seul.

○ Sur le plan de la durabilité des BTC stabilisée dans le contexte d'usage

L'incorporation des stabilisants dans le matériau terre a permis d'améliorer les propriétés de durabilité des BTC. On constate que pendant le test d'érodabilité, les échantillons stabilisés ont pu résister face au test d'érodabilité tel que : ceux stabilisés à 25% de CCR ont une profondeur d'érosion de 3.9 mm.h⁻¹ et 5% de surface érodée, ceux stabilisés à 12:8 CCR:CBR ont une profondeur d'érosion de 6.2 mm.h⁻¹ et 27 % de surface érodée, ainsi que ceux stabilisés à 0.8% de fibres ont une profondeur d'érosion de 4.7 mm.h⁻¹ et 21% de surface érodée. Sauf à l'exception des échantillons non stabilisés, n'ont pas résisté à l'essai d'érodabilité.

Pendant l'essai d'abrasion les échantillons stabilisés à 25% de CCR ont un coefficient d'abrasion de 29 cm².g⁻¹ et une perte de masse de 1%, ceux stabilisés à 12:8 de CCR:CBR ont un coefficient d'abrasion de 45 cm².g⁻¹ et une perte de masse de 0.02% et les échantillons stabilisés aux fibres ont un coefficient d'abrasion de 10 cm².g⁻¹ et une perte de masse de 0.17%.

Il convient également de noter que les tests effectués au laboratoire semblent être très sévères par rapport au contexte d'usage des BTC.

VI. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les recommandations suivantes sont formulées pour les recherches ultérieures:

- ✓ Mesurer la conductivité thermique en fonction des différents teneurs en eau, cela va permettre de voir si la conductivité thermique varie en fonction des teneurs en eau.
- ✓ Faire une analyse de confort acoustique des BTC, à travers la détermination des propriétés acoustiques.
- ✓ Étudier l'influence des différents teneurs en eau sur les propriétés mécaniques des BTC tel que l'essai de mouillage et séchage, la résistance humide
- ✓ Il est nécessaire de vérifier à long terme le comportement des sous-produits industriels utilisés pour la stabilisation des BTC.
- ✓ Analyser les Propriétés mécaniques à différents teneurs en eau

VII. BIBLIOGRAPHIE

- ✓ **AFNOR. 2001.** Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Saint-Denis La Plaine Cedex
- ANH-TUAN, CHEN et al 2012.** Effect of silica forms in rice husk ash on the properties of concrete. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials
- AZIALBE, 2019.** Influence des fibres polymériques sur performances des blocs de terre comprimées.
- BOFFOUE et al. 2015.** Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques. 2015: Afrique Science
- BOGAS, MIGUEL et al. 2018.** Unstabilized and stabilized compressed earth. Portugal: International Journal of Architectural Heritage.
- CID-FALCETO, MAZARRON et al. 2012.** Assessment of compressed earth blocks made in Spain: international durability tests. Construction building materials.
- EL HACHIMI. 2013.** Argile et minéraux argileux : propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés colloïdes. Maroc : s.n., 2013.
- FONTAINE ET ANGER. 2009.** Bâtir en terre. Belin, Cité des sciences et de l'industrie, Paris.
- GUETTALA, HOUARI, et al 2002.** durability of lime stabilized earth blocks. Algeria Courier du Savoir – N°02, Juin 2002.
- GUILLAUD, HOUBEN et al. 2006.** Traité de construction en terre. Parenthèses, Marseille, CRAterre,ICS. 2006.
- HAKIMI, OUISSI, et al. 1998.** Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre. Casablanca : Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE), 1998.
- HORPIBULSUK, PHETCHUAY et al. 2013.** Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash, Soils Found. 2013.
- HOUBEN., H. 1998.** Serie technologies no. 11, blocs de terre comprime. Brux : CRAterreEAG ISBN., 1998

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

IZEMMOUREN, GADRI, et al. 2013. effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée. 21ème congrès français de mécanique. Bordeaux

IDDRIM. 2015. Norme NF EN 459 : Chaux de Construction.

OLIVIER, MESBAH, et al 1997.. Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. s.l. : Building and Construction materials.1652., 1997.

SENI MOUSSA. 2019. étude des propriétés d'usage des briques de terre comprimées stabilisées au carbure de calcium résiduel : terre argileuse de pabre -burkina faso. ouagadougou : institut international d'ingénierie 2ie, 2019.

PAPE, SAMBOU, et al 2017. Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth. Senegal : Journal of Building Engineering, 2017.

NSHIMIYIMANA, MIRAUCOURT, et al 2018. Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash for. 10.1557/adv.2018.147 : Materials Research Society, 2018.

REAL,et al. 2016. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. s.l. : Magazine Concrete Researcher 68, 2016.

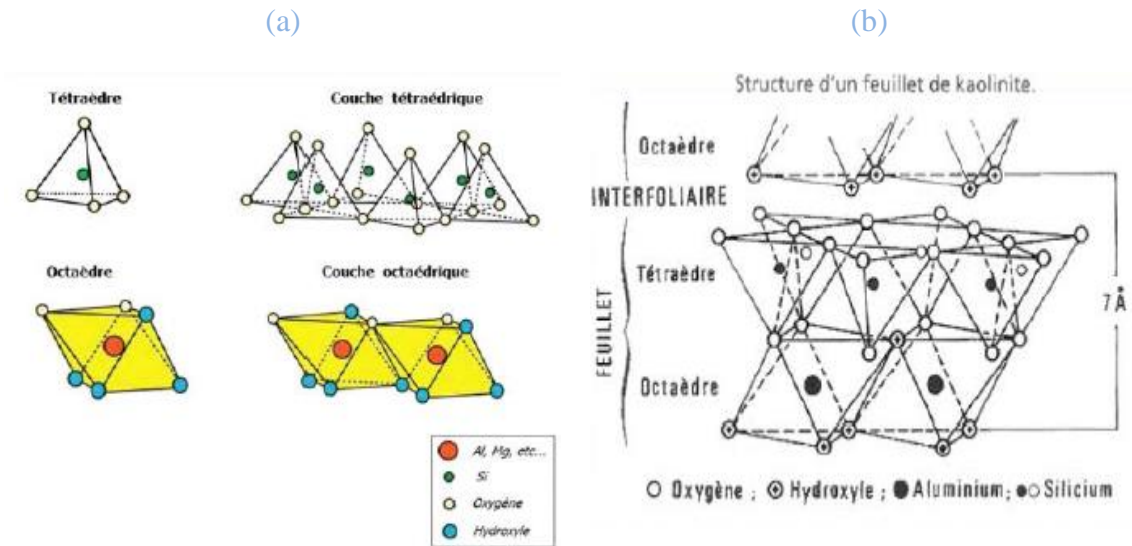
REDDY, VENKATARAMA, et al 2007. Optimum Soil Grading for the Soil-CementBlocks.Journal of materials in civil engineering © asce, february 2007.

SORE. 2017. Synthèse et caractérisation des liants géopolymères à base des matériaux locaux du Burkina Faso en vue d'une stabilisation des Briques en Terre Comprimées (BTC). s.l. : Building and Construction materials. 2iE/2017-07. CDI, 2017.

Walker. 1995. Strength, durability and shrinkage characteristics. 1995.

Walker, Peter. 1997. characteristics of pressed earth blocks in compression. shanghai, china, : 11th international brickblock masonry conference, 16 october 1997.

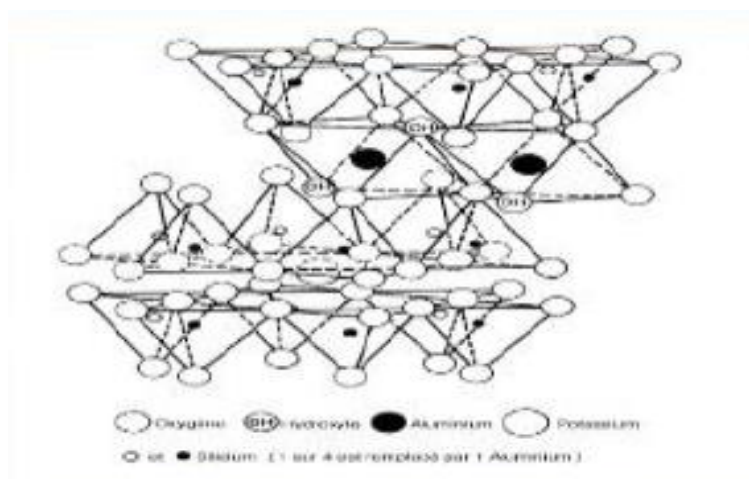
ANNEXES 1 : MINERALOGIE DES MATERIAUX POUR BTC



Structure d'une couche tétraédrique et/ou octaédrique (Abdelhadi EL HACHMI 2013)

Structure d'un feuillet de kaolinite (Abdelhadi EL HACHMI 2013)

(c)



Structure des minéraux de la famille des micas (l'illite) (Abdelhadi EL HACHMI 2013)

Figure 17 : les structures minéralogiques des argiles rencontrées dans le matériau de Kamboinsé

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso



Figure 18 : (a) Argile quartée et tamisée, (b) Carbone de calcium résiduel séché, broyé et tamisé et (c) balle du riz incinéré à 500 degrés, (d) mélange d'argile plus carbone de calcium.

ANNEXE 2 : LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Cette annexe présente essentiellement les principaux dispositifs expérimentaux utilisés au cours des expérimentations de cette étude. Les bancs d'essai et de manipulation pour les principales mesures sont présentés ici

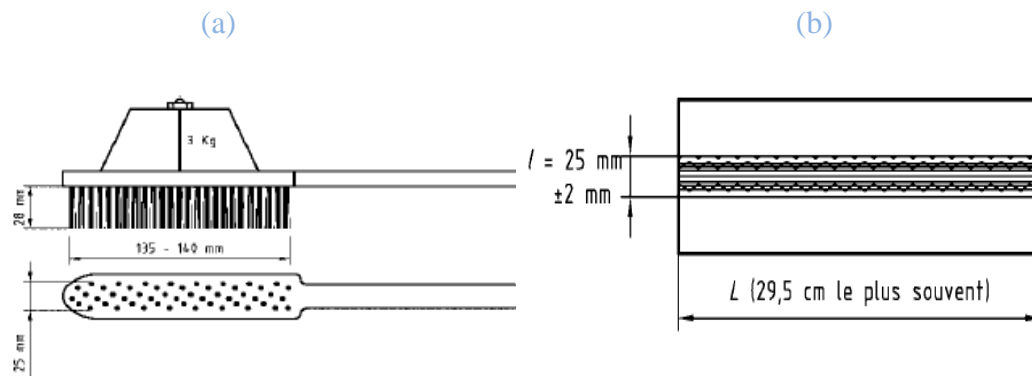


Figure 19 : Dispositif pour l'essai d'abrasion (M. Olivier et al. 1997)

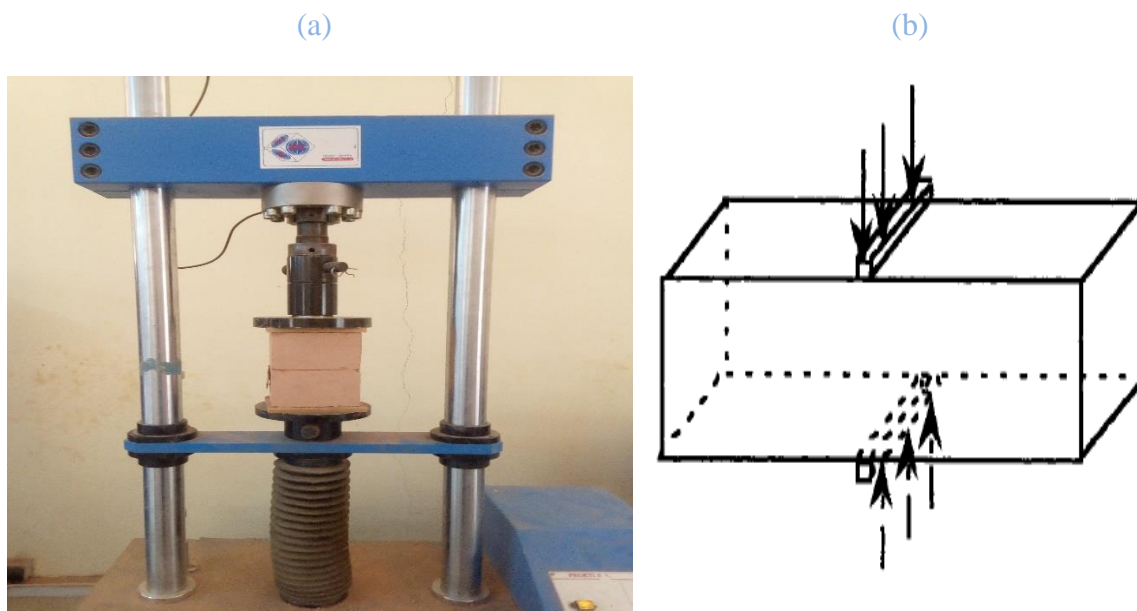


Figure 20 : (a) Dispositif de test des résistances mécaniques, (b) Dispositif de fendage (M. Olivier et al. 1997)

Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso

(a)



(b)

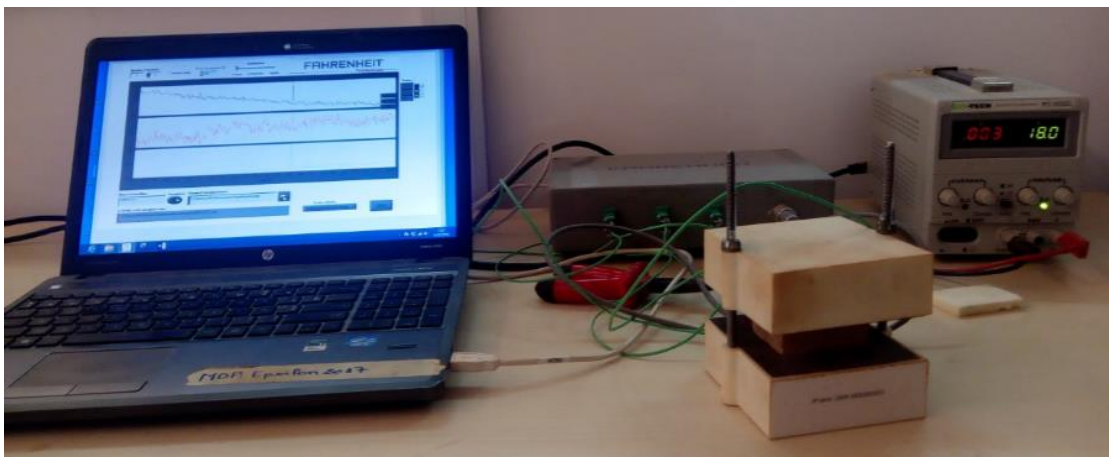


Figure 21 : (a) Essai d'érodabilité avec une pompe à une pression de 5 bars, (b) Mesure des propriétés thermiques des échantillons de BTC en utilisant DEsProTherm.