



**ETUDES TECHNIQUES DES BTC STABILISES A LA CHAUX  
ETEINTE**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTE 2  
OPTION : GENIE CIVIL.**

Présenté et soutenu publiquement le **25/06/2013** par

**Seick Omar SORE**

**Travaux dirigés par : Mr Koffi KOKOLE**

**Dr Adamah MESSAN**

**CENTRE COMMUN DE RECHERCHE ENERGIE ET HABITAT DURABLE/  
LABORATOIRE ECO – MATERIAUX DE CONSTRUCTION.**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Adamah MESSAN

Membres et correcteurs : Remy MINANE

Koffi KOKOLE

**Promotion [2012/2013]**

**DEDICACE**

*Pour leur exprimer ma profonde gratitude,*

*je dédie ce modeste mémoire à :*

*- Allah le tout puissant ;*

*- Mon père ;*

*- ma mère;*

*- frères et sœurs ;*

*- tous ceux qui m'ont assisté durant ma formation.*

**REMERCIEMENTS**

La rédaction de ce mémoire n'aurait été possible sans le concours de certaines bonnes volontés. Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui, malgré leurs multiples occupations, n'ont ménagé aucun effort pour que ce document soit une réalité.

Qu'il me soit permis de remercier particulièrement:

- ✓ La Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers son personnel, pour leur engagement dans la réussite de notre formation.
- ✓ Mes encadreurs Enseignants, Enseignants-Chercheurs et Professeur, je cite : François TSOBNANG, Adamah MESSAN, Abdou LAWANE, Koffi KOKOLE, Remy MINANE et Salif KABORE pour leur entière disponibilité, leurs conseils et leurs éclaircissements qui m'ont tant servi ;
- ✓ La Direction Générale de la société Burkina Industrial Gas (BIG)
- ✓ L'ensemble du corps enseignant du 2iE pour les connaissances qu'ils nous ont transmises au cours de la formation du cycle de master ;
- ✓ Ma famille pour son soutien ;
- ✓ Mes oncles et tantes pour leur soutien également ;
- ✓ Mes camarades et ami(e)s, pour leur présence à mes côtés.

### Résumé

En Afrique, les matériaux de construction usuellement utilisés sont le béton et le mortier qui présentent un certain nombre de désavantages tels que leurs impacts dommageables sur l'environnement et leurs mauvaises propriétés thermiques. Le souci de fabriquer des briques de terre ayant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques a fait l'objet d'une étude. C'est dans ce cadre que le Laboratoire Eco-Matériaux de Construction du ZIE s'est lancé dans la valorisation des déchets industriels (Chaux éteinte) de BIG à travers la stabilisation des BTC. Ce mémoire met donc en évidence la valorisation de la chaux éteinte dans l'amélioration des propriétés physico-mécaniques, et thermiques des BTC.

Des BTC stabilisés à 10, 15% et 20% de chaux éteinte ont été produits à l'aide de la presse mécanique TERSTARAM. Comme matériau de référence, des briques contenant 10% de ciment ont également été produits. Les BTC stabilisés à la chaux éteinte ont été testés à 45 jours de cure tandis que les caractérisations des BTC stabilisés au ciment ont eu lieu à 21 jours de cure. Les résultats ont révélé une amélioration des propriétés intrinsèques des BTC par la chaux éteinte. Les meilleures propriétés physiques et mécaniques ont été obtenues avec les échantillons de BTC contenant 15% de chaux éteinte. Les pourcentages d'absorption d'eau des BTC contenant 15% de Chaux éteinte ont été d'environ 9.29% (par submersion) et 5.88% (par capillarité). En outre, leurs résistances à la compression sèche et humide ont été respectivement de 5.02 et 3.03MPa. Aussi, la résistance moyenne à la flexion a été de 1.27MPa. Par ailleurs, ces briques ont obtenu une conductivité thermique (1.01 W/m.K), une chaleur spécifique (2.50 MJ/m<sup>3</sup>.K) et une diffusivité thermique (0.41 mm<sup>2</sup>/s), minimales. Un Testeur de Vitesse de Pulsation Ultrasonique portable a aussi été utilisé pour évaluer les modules dynamiques de Young des différents échantillons. Les résultats ont montrés une corrélation forte entre résistances mécaniques et vitesse de pulsation des blocs.

Mots clés : Latérite, BTC, stabilisation, chaux éteinte et études techniques.

**Abstract**

In Africa, building materials commonly used are concrete and mortar which have a certain number of disadvantages such as their negative impact on the environment and their poor thermal properties. The regard for making mud bricks with good mechanical and thermal properties has been an object of study. It is in this frame that the Laboratory of Eco-Construction Material 2IE was launched in the recycling of industrial wastes' (slaked lime) BIG through the stabilization of Compressed Earth Blocks. This thesis therefore highlights the value of hydrated lime BIG in the stabilization process of CEB in improved physical, mechanical properties, and thermal CEB. CEB stabilized at 10, 15% and 20% lime were produced using a mechanical press TERSTARAM. As reference material, bricks cement containing 10% were also produced. CEB stabilized slaked lime was tested at 45 days of treatment while the characterization of cement stabilized CEB took place at 21 days of curing. The results showed an improvement in the intrinsic properties of CEB by slaked lime. The best physical and mechanical properties were obtained with samples containing 15% of CEB lime. The percentages of water absorption of the CEB containing 15% Hydrated lime were approximately 9.29% (flood) and 5.88% (capillary). In addition, their strengths to the dry and wet compressive were 5.02 and 3.03MPa respectively. Also, their flexural strength was 1.27MPa medium. Besides, bricks stabilized at 15%, obtained thermal conductivity (1.01 W /m.K), specific heat (2.50 MJ/m<sup>3</sup>.K) and thermal diffusivity (0.41 mm<sup>2</sup> / s), minimum. A Tester Speed Ultrasonic Pulse laptop was also used to evaluate the dynamic Young's moduli of the different samples. The results have shown a strong correlation between mechanical strength and speed pulse blocks.

Keys words: Laterite, Compressed Earth Blocks, Slaked lime, Stabilization and Technical study.

**LISTE DES ABREVIATIONS**

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement ;

BTC : Brique de Terre Comprimée ;

BTS : Blocs (ou briques) de Terre Stabilisée ;

$I_p$  : Indice de plasticité ;

LEMC : Le Laboratoire d'Eco-Matériaux de Construction ;

$W_1$  : Limite de Liquidité ;

$W_p$  : Limite de Plasticité ;

K : Conductivité Thermique (W/m.K) ;

C : Chaleur spécifique (MJ/m<sup>3</sup>.K) ;

D : Diffusivité thermique (mm<sup>2</sup>/s) ;

CC3D : Construction Consolidé en 3 Dimensions ;

Ap : Argile peu plastique.

**TABLE DES MATIERES**

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS .....	iii
Résumé .....	iv
Abstract .....	v
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. Contexte et Problématique.....	2
II. Objectif.....	2
Chapitre 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES.....	3
1.1 Définitions .....	3
1.1.1 BTC.....	3
1.1.2 La terre (latérite) .....	3
1.1.3 Chaux éteinte .....	4
1.2 Processus de stabilisation .....	6
1.3 Processus de production .....	8
1.3.1 Extraction de la terre d’une carrière.....	8
1.3.2 Stockage et Séchages .....	8
1.3.3 Tamisage .....	8
1.3.4 Malaxage.....	9
1.3.5 Production .....	9
1.3.6 Temps de cure .....	10
Chapitre 2 : MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES.....	11
2.1 Essais d’identification des matériaux .....	11
2.1.1 Analyse granulométrique .....	11
2.2 Etudes des propriétés des BTC stabilisés à la chaux éteinte .....	15
2.2.2 Propriétés mécaniques.....	18
2.2.3. Propriétés Thermiques. ....	21
Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	23
3.1. Propriétés physiques .....	23

---

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

---

3.1.1. Densités apparentes.....	23
3.1.2 Absorption capillaire et capacité d'absorption.....	24
3.2. Propriétés mécaniques .....	26
3.2.1 Résistance à la compression sèche et humide .....	26
3.2.2 Résistance à la flexion .....	29
3.2.3 Module de Young (Vitesse de propagation) .....	30
3.3 Propriétés thermiques .....	32
3.3.1 Résultats .....	32
3.3.2 Analyse et Interprétation des résultats .....	33
Chapitre 4 : IMPORTANCE DES BTC.....	35
4.1 Développement durable.....	35
4.2 Ecologique .....	35
4.3 Sanitaire .....	35
4.4 Confort et esthétique.....	36
4.5 Economique .....	36
4.6 Inconvénients.....	36
CONCLUSION .....	37
BIBLIOGRAPHIE .....	38
ANNEXES .....	39

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Processus de stabilisation .....7

Tableau 2: Résultats obtenus par J.E. OTI, J.M.KINUTHI .....7

Tableau 3: Classification des BTC selon la résistance donné par CRA Terre .....7

Tableau 4: Résultats obtenus par l'étudiant BOKOR YOUSOUF SAKINE, 2011 .....8

Tableau 5: Résultats de limites d'Atterberg .....13

Tableau 6: Résultats de poids spécifique .....15

Tableau 7: Récapitulatif des essais d'identification des matériaux.....15

Tableau 8: Résultats de densité apparente.....23

Tableau 9: Résultats de capillarité et d'absorption d'eau.....24

Tableau 10: Résultat de compression sèche et humide à 45 jours .....26

Tableau 12: Résultats de flexion trois points .....29

Tableau 13: résultats de vitesse de propagation .....30

Tableau 14: Résultats des propriétés thermiques .....32

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Fuseau de CRATerre pour une stabilisation à la chaux éteinte ( <i>CRATerre, 95</i> ).....	4
Figure 3: Malaxeur TERSTARAM.....	9
Figure 4: Presse TERSTARAM.....	10
Figure 5: Courbe granulométrique et Fuseau de CRATerre .....	12
Figure 6: Abaque de Cazagrande de l'argile.....	13
Figure 7: Mesures des dimensions des blocs .....	16
Figure 8: Dispositif d'essai d'absorption capillaire.....	18
Figure 9: Essai de compression.....	19
Figure 10: Essai de flexion.....	20
Figure 11: essai de Poudit .....	21
Figure 12: Appareil KD2 Pro.....	22
Figure 13: Représentation graphique de la densité apparente.....	23
Figure 14: Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau .....	25
Figure 15: Représentation de la compression sèche et humide à 45 jours.....	27
Figure 16: Représentation graphique des essais de compression sèche et humide à 75 jours .....	28
Figure 17: Représentation graphique de flexion trois points .....	29
Figure 18: Représentation graphique des vitesses de propagation.....	31
Figure 19: Représentation graphique des propriétés thermiques .....	33

## **INTRODUCTION GENERALE**

La terre encore appelé latérite est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le ciment et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en voie de développement comme dans les pays industrialisés.

Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques. Si elle est employée de façon raisonnée et avec des moyens modernes, elle peut être à la fois performante, durable, économique en énergie et à moindre cout.

C'est ainsi que nos recherches menées au Laboratoire Eco-matériaux de Construction entrant, dans le cadre des études, consistaient à valoriser et à développer les matériaux locaux utilisés dans la construction au Burkina Faso et partout au monde. Dans le cadre d'un projet de recherche, un intérêt particulier a été donné aux matériaux terre et chaux éteinte. L'objectif de cette étude est de renforcer les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des BTC à travers une stabilisation à la chaux éteinte. Pour des conditions pratiques et économiques, nous nous sommes fixés dans le cadre de notre étude à des taux de chaux éteinte allant de 10 % à 20 %. Une comparaison sera faite avec les BTC stabilisés à 10% de ciment.

## **I. Contexte et Problématique**

La société BURKINA INDUSTRIAL GAS (BIG) produit et commercialise des gaz industriels, médicaux et de laboratoire au Burkina Faso. Le produit de rejet issu de la fabrication des divers gaz est la chaux éteinte disponible en très grande quantité. Le stock de la production de 2012 est estimé à 3 tonnes. Ces déchets sont jusqu'à nos jours stockés et ou jetés dans la nature ; cela pose un problème économique et environnemental. Soucieux de valoriser ces déchets industriels, BIG a sollicité le laboratoire (LEMC), dont un des axes de recherches porte sur la valorisation des sous-produits industriels dans le domaine de la construction.

Dans ce contexte, le LEMC s'est engagé, pour faire face aux exigences de BIG, à étudier les possibilités de recyclage de ces importantes quantités de déchets industriels dans les divers secteurs du Génie Civil, en particulier en vérifiant la faisabilité de l'utilisation de la chaux éteinte comme stabilisant dans la fabrication des briques de terre comprimée (BTC). La valorisation des matériaux locaux dans la construction d'habitations et bâtiments publics est une nécessité dans l'optique du développement durable. La réduction d'utilisation de béton pour les pays à faible revenu a des retombées tant au niveau environnemental qu'au niveau économique.

## **II. Objectif**

L'objectif général de ce projet est la valorisation des matériaux locaux à savoir la terre et le résidu industriel de l'industrie BIG qui est la chaux éteinte. Vulgariser à vaste échelle l'utilisation de ces matériaux est aussi l'un des objectifs visé. Pour atteindre ces objectifs, il nous faut prouver l'amélioration des paramètres essentiels (physico-mécaniques et thermiques) des BTC à travers cette stabilisation à la chaux éteinte de BIG.

## Chapitre 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES

Pour une meilleure compréhension des termes de référence du sujet, il nous a fallu faire une recherche bibliographique afin de bien aborder notre sujet, cela nous a obligés à consulter un grand nombre de documents de référence sur les BTC en général comme par exemple Traité de construction en terre, CRATerre, 95 ; Le bloc de terre comprimée : Elément de base, CRATerre, 91 et J.E Oti, J.M. Kinuthia, 2009, Engineering properties of unfired clay masonry bricks...

Ces recherches nous ont permis de faire un recueil des données et informations existantes. Des recherches à travers les moteurs de recherche sur Internet nous ont aussi guidé tout au long dudit travail. Nous avons également consulté des projets similaires effectués par d'autres étudiants toujours dans le même ordre d'idée en l'occurrence des projets de mémoires ou de thèses de doctorat dans le but d'éviter des répétitions et apporter un plus.

### 1.1 Définitions

#### 1.1.1 BTC

Le **BTC** est une approche quasi industrielle de l'adobe (banco), dans la mesure où il y a une standardisation du modèle fabriqué et un accroissement de la productivité liée à l'utilisation de machines, parfois rudimentaire, mais aussi perfectionnées et multitâches. La matière utilisée est une terre sablo-argileuse souvent additionnée au ciment ou à la chaux. L'utilisation d'une presse permet d'avoir des éléments parfaitement calibrés. Le modèle couramment fabriqué a des dimensions suivantes : 29.5cm×14cm×9 cm. On peut avoir d'autres modèles de BTC avec la même presse, en changeant le moule. La mécanisation de la fabrication de la BTC permet d'avoir des briques parfaitement calibrées, de la qualité relativement identique. La compression de la terre dans le moule est à l'origine de sa bonne résistance mécanique après séchage. La terre est comprimée, sous forme de blocs, dans un moule. Auparavant ; la terre était compactée dans un moule à l'aide de petit pilon, ou en rabattant avec force un couvercle très lourd dans le moule (*Bloc de terre comprimée, Equipement de production ; Guide, CRATerre, 97 [9]*)

#### 1.1.2 La terre (latérite)

La terre utilisée dans notre cas est de type argileux. L'**argile** est une [roche sédimentaire composée](#) pour une large part de minéraux spécifiques, [silicates](#) en général d'[aluminium](#) plus ou

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllo silicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. (CRATerre, 95.)

On appelle également argile l'ensemble des fractions minérales inférieures à 2  $\mu\text{m}$  dans une roche. Cependant toutes les terres ne conviennent pas pour la fabrication des blocs. Il existe quelques règles dont le but est d'écarter rapidement les terres de trop mauvaise qualité. On estime que la meilleure terre doit :

✚ Avoir une courbe granulométrique comprise dans le fuseau de CRATerre pour une stabilisation à la chaux éteinte ;

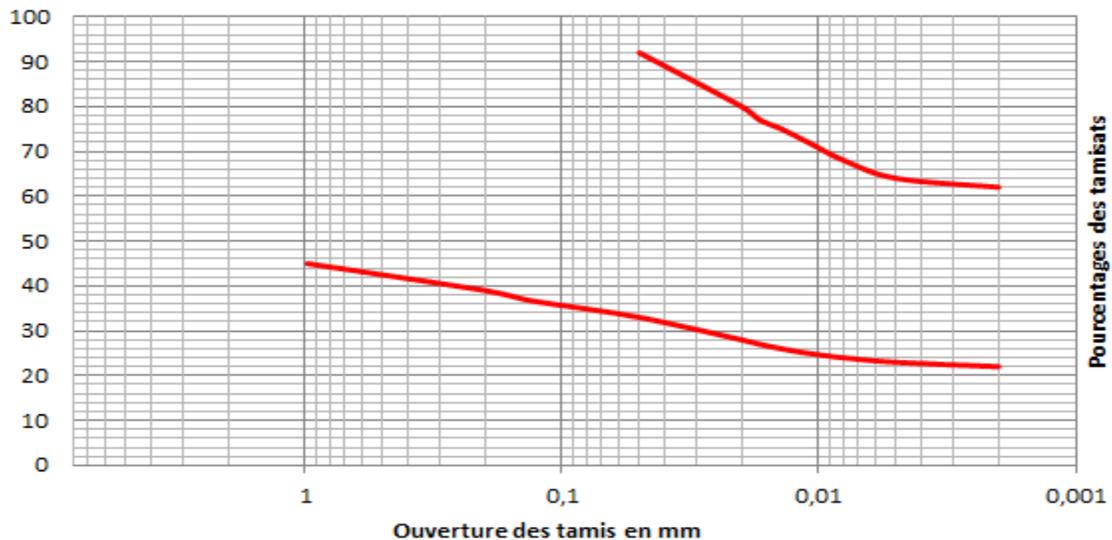


Figure 1: Fuseau de CRATerre pour une stabilisation à la chaux éteinte (CRATerre, 95)

✚ les caractéristiques suivantes sont aussi à considérer:

- ✓  $W_L$  : compris entre 37 et 52 ;
- ✓  $IP$  : compris entre 20 et 35.

✚ Selon la classification USCS, la latérite doit être de type **Ap** (argile peu plastique) ou **At** (argile très plastique). (CRATerre 95)

### 1.1.3 Chaux éteinte

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur, qui, porté à une température d'environ 1000 degré, et suite à une réaction chimique se décompose en chaux vive (CaO) et en gaz carbonique.



Après cuisson, la chaux vive garde le même aspect physique mais sa masse volumique apparente devient plus faible. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur, puis se transforme en une poudre blanche appelée **chaux éteinte** ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).



Figure 2: fabrication de la chaux éteinte

Chaux vive :  $\text{CaO}$  nom chimique « Oxyde de calcium »

Chaux éteinte :  $\text{Ca(OH)}_2$  nom chimique « Hydroxyde de calcium » (*C. Abdelkalek et all, 2012*)

Les effets de la chaux sont très dépendants de la nature des terres mais la comparaison avec les effets du ciment, dans de nombreux cas, pourra être tentée. On observe que la chaux réagit beaucoup plus avec des argiles du type montmorillonites qu'avec des argiles kaolinitiques, réduisant la plasticité des montmorillonites et n'ayant que peu d'effet sur la plasticité des kaolinites. Par contres donne des meilleurs résultats de compression avec les argiles de type kaolinitiques. Notons par ailleurs que les dosages en chaux sont toujours donnés pour des chaux de qualité industrielle contenant plus de 90% de "chaux active". Pour les chaux artisanales, qui

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

peuvent ne contenir que 60% de chaux active (le reste étant constitué d'incuits ou de surcuits), il faudra augmenter ces dosages.

Cependant la chaux éteinte que nous utilisons dans notre formulation est un résidu issu de la production du gaz d'acétylène produit par la société BIG (Burkina Industrial Gas). Ce gaz est obtenu par l'hydratation du **carbure de calcium** de [formule brute](#)  $\text{CaC}_2$ , il se présente sous la forme de cailloux qui peuvent paraître naturels, bien qu'ils soient produits de manière industrielle. Au contact de l'eau, il produit de l'[acétylène](#) et de la chaux éteinte sous forme liquide. Cette réaction est très [exothermique](#) :



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 stocké dans une piscine et se transformé en poudre au cours du temps et sous l'action du soleil.

### **1.2 Processus de stabilisation**

Les terres utilisées pour la fabrication des briques de terre n'ont pas toujours toutes les propriétés requises pour cette opération. La stabilisation consiste essentiellement à utiliser au mieux les qualités que possède déjà la terre et à lui conférer des qualités qu'elle ne possède pas seule. On ne peut donc pas stabiliser n'importe quelle terre avec n'importe quel stabilisant. Une terre impropre à la construction ne fournira jamais une bonne brique, même stabilisée. La stabilisation peut servir à améliorer les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des BTC. A propos nous avons opté de procéder à des dosages de 10 ; 15 et 20% de chaux éteinte et comparer cette stabilisation à un dosage de 10% de ciment. A partir des dimensions des deux moules on a évalué le volume total de latérite avec laquelle on a affecté les pourcentages de stabilisation pour ainsi trouver les volumes des stabilisants (ciment et chaux éteinte). Les masses volumiques apparentes nous permettent enfin de retrouver les masses correspondantes à chaque volume.

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

**Tableau 1: Processus de stabilisation**

Processus de stabilisation						
Désignation		10% de ciment	10% de Chaux	15% de Chaux	20% de Chaux	TOTAL
<b>BRIQUES</b>	14*14*9	16,00	16,00	16,00	16,00	84,00
	29,5*14*9	3,00	3,00	3,00	3,00	12,00
<b>VOLUME (m3)</b>	volume latérite (m3)	0,03938	0,03938	0,03938	0,03938	0,158
	volume ciment (m3)	0,00394				0,004
	volume chaux (m3)		0,00394	0,00591	0,00788	0,018
<b>MASSE (Kg)</b>	Masse latérite $\rho_{ap}= 1180\text{kg/m}^3$	46,46	46,46	46,46	46,46	185,85
	Masse ciment $\rho_{ap}=3100\text{kg/m}^3$	12,21				12,206
	Masse chaux éteinte $\rho_{ap}= 575$		2,26	3,40	4,53	10,19

### Exemple de résultats de stabilisation à la chaux éteinte fait par d'autres auteurs

**Tableau 2: Résultats obtenus par J.E. OTI, J.M.KINUTHI**

Auteurs	Années	Matériel	Essais	Résultats					
				Echantillons		7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
<b>J.E. OTI, J.M. Kinuthi</b>	2009	BTC stabilisée à la chaux	Résistance en compression simple		RCm				
				LG1		2,8	3,8	6,5	7,4
				LG2		2,4	3,7	5,6	6
				PG1		1,7	3,4	5	5,5
				PG2		1,5	3,3	4,8	5,1

LG1 et LG2 sont des briques stabilisés à la chaux éteintes ;  
PG1 et PG2 sont des briques stabilisés à la chaux hydrauliques.

**Tableau 3: Classification des BTC selon la résistance donné par CRATerre**

Classe des BTC stabilisées par CRATerre, selon la résistance à la compression.				
Latérite stabilisée 12 à 19% chaux comprimé à 300 bars				
Classes	A	B	C	D
Résistance à la compression sèche à 25 jours (MPa)	> 12	[5 ; 12]	[2 ; 5]	< 2
Résistance à la compression humide à 25 jours (24h dans l'eau) (MPa)	>2	[1 ; 2]	[0,5 ; 1]	[0; 0,5]

**Tableau 4: Résultats obtenus par l'étudiant BOKOR YOUSOUF SAKINE, 2011**

Dosage(%)	Surface (mm²)	Charge de rupture(kN)		Résistance à la compression (MPa)	
		Charge	Moyenne	Résistance	Moyenne
0	19530	12,94	17,54	0,66	0,90
	19321	17,25		0,89	
	19600	22,44		1,14	
5	19546,80	25,03	26,04	1,28	1,33
	19503,48	26,32		1,35	
	19526,56	26,75		1,37	
10	19556,62	15,09	17,40	0,77	0,88
	19593,00	18,98		0,96	
	19544,03	18,11		0,92	
15	19582,5	28,04	30,63	1,43	1,56
	19582,5	33,23		1,69	
	19586,7	30,63		1,56	

Notre objectif dans cette étude est d'obtenir plus ou moins les mêmes résultats présentés plus haut en utilisant la chaux éteinte de BIG afin de leur prouver d'une part la valorisation de leur résidu industriel et participer d'autre part au développement durable.

### 1.3 Processus de production

#### 1.3.1 Extraction de la terre d'une carrière

L'opération d'extraction fait appel à l'emploi d'un outillage manuel simple le plus souvent hérité des travaux agricoles ou des travaux manuels routiers ou miniers : Pics, pioches, bèches, pelles, barre à mine, râteliers... L'extraction manuelle de la terre exige beaucoup de la main d'œuvre. Divers engins mécaniques peuvent être employés.

#### 1.3.2 Stockage et Séchages

Le matériau doit être bien stocké dans un endroit bien aéré et suffisamment vaste permettant l'épandage en couche mince ou cyclone à air chaud pour le séchage. Cet endroit doit être aussi éloigné de tout débris végétaux pouvant rendre le matériau inutilisable.

#### 1.3.3 Tamisage

Le tamisage est indispensable lorsqu'on sent la présence de défauts de texture comme les gros grains et les matières organiques. Le diamètre des grains dépend de la technique employée et de la spécificité du projet. On tamise le plus souvent entre 5 et 10 mm. Dans le cas présent on a adopté le tamis fixe de 5 mm pour le tamisage. Il s'agit d'un treillis métallique fixé sur un cadre rigide en bois. Ce cadre est maintenu obliquement par des appuis rigides suspendus verticalement. On fait passer la terre à travers le tamis de 5 mm qui retient les éléments grossiers et indésirables. Le chargement se fait manuellement à l'aide des pelles par des manœuvres.

### 1.3.4 Malaxage

Le malaxage est particulièrement important. Un mélange homogène est indispensable, avec ou sans stabilisant. Manuellement il faut retourner la terre au moins 4 fois. Avec un malaxeur mécanique puissant, 3 à 4 minutes s'imposent. Il est indispensable d'opérer d'abord par un malaxage à sec. Pour une humidification homogène, l'eau est soit ajoutée en pluie fine (arrosoir), en atomisation (nuage) ou en vapeur sous pression.

En ce qui concerne notre cas, nous avons utilisé un malaxeur à axe de « TERSTARAM »



**Figure 3: Malaxeur TERSTARAM**

### 1.3.5 Production

La production nécessite un espace assez vaste à cause des différents stockages (matière première et blocs). La production de BTC se fait à l'aide des presses manuelles adaptées aux différents types de blocs réalisés mais il existe aussi des presses mécanisées permettant une grande production d'où un bon rendement. Ce sont des presses conçues pour produire des différentes formes de briques. Elles nécessitent deux ouvriers qualifiés plus un ouvrier qui amène le matériau. L'amélioration de la densité, c'est-à-dire la diminution de la porosité de la terre est obtenue en comprimant la terre dans la presse. Cette densification s'obtient par la mise en œuvre d'efforts de resserrement statique ou dynamique. Le pressage consiste à resserrer les grains modifiant ainsi la structure de la terre. Notons qu'il existe deux types de presse : la presse manuelle et la presse hydraulique. Pour notre projet, nous avons utilisé la presse manuelle. L'image ci-dessous donne un aperçu de presse manuelle.



**Figure 4: Presse TERSTARAM**

### 1.3.6 Temps de cure

Les conditions de conservation des BTC jouent un rôle primordial dans le processus de leur stabilisation et dans l'évolution de leur résistance. Le séchage trop rapide peut endommager les blocs car ils vont perdre leur teneur en eau optimale. Pour éviter cela, Généralement le séchage se fait à l'ombre. Pour les blocs stabilisés à la chaux éteinte, la présence d'eau à l'intérieur des blocs est indispensable pour que le BTC atteigne sa résistance maximale. Les blocs doivent non seulement abrités du soleil mais aussi les maintenir en ambiance humide: risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissure de retrait. Pour notre cas, les briques produites sont ensuite soumises à une condition de cure sous un film plastique afin de conserver la teneur en eau. Le temps de cure des BTC stabilisés à la chaux éteinte est au moins (04) quatre semaines et 90 jours souhaitables. (Doctor E.A. Adam et all. 2001).

Compte tenu de notre période de stage (04mois), tous les essais de caractérisations se feront à partir de 45 jours de cure.

## Chapitre 2 : MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES

### 2.1 Essais d'identification des matériaux

La latérite utilisée pour ces essais provient d'un chantier de Construction Consolidé en 3 Dimensions (CC3D) sis sur le site de 2iE Kamboinsin. Ces essais ont pour but de caractériser le matériau qui sera exploité pour la production de nos BTC.

#### 2.1.1 Analyse granulométrique

Cet essai permet de savoir si la courbe granulométrique générale du matériau s'inscrit dans le fuseau de CRATerre pour la stabilisation à la chaux éteinte.

##### 2.1.1.a Analyse granulométrique par tamisage (Norme NFP 18-560, NFP 18-540)

###### ❖ But

L'analyse granulométrique par tamisage permet une répartition pondérale des grains du sol suivant leur dimension, de calculer la proportion cumulée passant à chaque tamis et établir la courbe granulométrique.

###### ❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (6.3mm à 0.08mm) emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau utilisé est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration des colonnes. On note le poids du refus de chaque tamis sur une fiche granulométrique enfin de pouvoir calculer les pourcentages des tamisât et tracer la courbe granulométrique.

##### 2.1.1.b Analyse granulométrique par sédimentométrie (Norme NFP 94-093)

###### ❖ But

La sédimentométrie intervient dans le cadre de l'analyse granulométrique des fines ( $< 80 \mu\text{m}$ ) d'un sol. Elle permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

###### ❖ Principe de l'essai

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

Elle consiste à prélever 40g dans les passants au tamis de 80  $\mu\text{m}$  de l'échantillon utilisé ensuite, nous avons ajouté 60ml de solution défloculante (hexamétaphosphate de sodium) et 440cm<sup>3</sup> d'eau distillée, laisser au repos environ 14 heures, on les agite pendant 5mn avec l'agitateur électrique avant de les mettre dans chaque tube et compléter avec l'eau distillée jusqu'au trait de 2000 ml. Les mesures sont faites à l'aide d'un densimètre après agitation manuelle.

### ❖ Résultats

A l'issu de cet essai nous remarquons que la courbe granulométrique se trouve à l'intérieur du fuseau de CRATerre pour une stabilisation à la chaux éteinte.

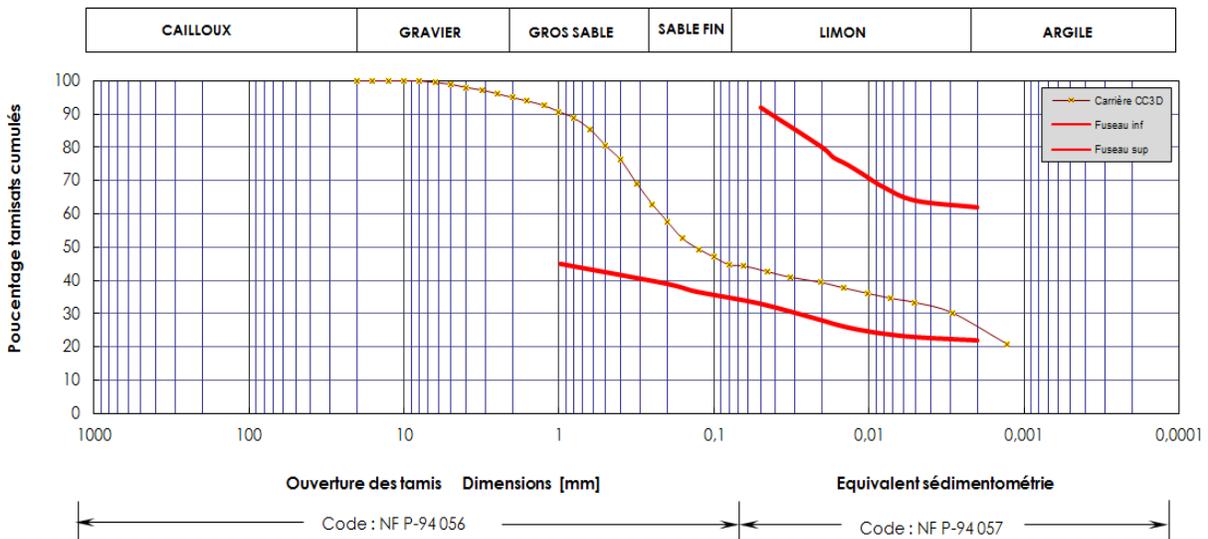


Figure 5: Courbe granulométrique et Fuseau de CRATerre

### 2.1.2 Limites d'Atterberg

#### 2.1.2. a Limites de liquidité

Cet essai permet également de vérifier le deuxième critère de choix de la latérite utilisée : la consistance du sol.

### ❖ But

Il consiste à déterminer la teneur en eau de notre échantillon lors de son passage de l'état liquide à l'état de plasticité par la méthode de la coupelle de **casagrande**.

### ❖ Principe de l'essai

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

Elle consiste à déterminer la teneur en eau de l'échantillon. Cet échantillon est lavé au tamis de 0,4mm afin de récupérer le tamisât. Ce tamisât, une fois transformé en pâte homogène, est répartie dans la coupelle. A l'aide de l'outil à rainure, elle est divisée en deux (02) parties égales. Ensuite, on porte des coups à la coupelle grâce à la manivelle jusqu'à obtenir une fermeture d'un centimètre de la pâte. Une tranche de cette pâte sera pesée humide puis séchée à l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau. L'opération est effectuée cinq (05) fois et on s'assure que la plage de coups [15-35] est respectée.

### 2.1.2. b Limites de plasticité

#### ❖ But

Cet essai a pour but de déterminer la teneur en eau de l'échantillon à son passage de l'état plastique à l'état solide.

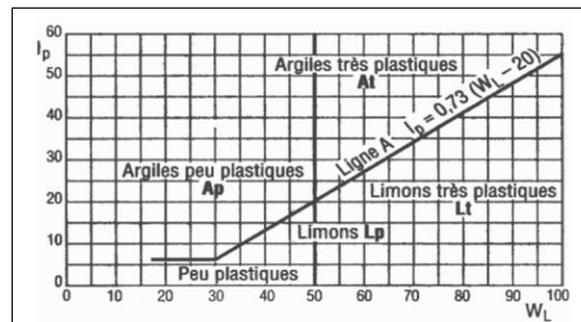
#### ❖ Principe de l'essai

Elle consiste à rouler à la main l'échantillon de la pâte utilisée pour la limite de liquidité. Puis, avec la paume de la main on forme un bâtonnet fin de diamètre 3mm. En le roulant, on devra observer des cassures du bâtonnet pour conclure que la limite de plasticité est atteinte. La manipulation se fait à quatre (04) fois. Enfin les morceaux de chaque bâtonnet, pesé humide est alors séché à l'étuve pour avoir la teneur en eau.

#### ❖ Résultats

**Tableau 5: Résultats de limites d'Atterberg**

LIMITES D'ATTERBERG			
Désignation	limite Liquidité	Limite de Plasticité	Indice de plasticité
Essai	47,5	20,8	26,7
Normes	[37; 52]	Néant	[20; 35]



**Figure 6: Abaque de Casagrande de l'argile**

La limite de liquidité (47.5%) est inférieure à 50% et la limite de plasticité (20.8) est au-dessus de la ligne A (figure 6). Donc la latérite est de type Ap (Argile peu plastique) selon la classification USCS. La deuxième condition de caractérisation est satisfaite.

### **2.1.3 Essai de Bleu de méthylène : VBS (Norme NF P 11-300 -GTR)**

❖ **But**

Cet essai constitue un paramètre d'identification qui mesure globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sol argileux.

❖ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/5 mm du sol. La valeur de bleu est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des matériaux argileux présents dans la fraction fine du sol. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'absorption après chaque ajout. Pour cela, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur le papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu claire persistante se produit à la périphérie de la tache.

❖ **Résultats**

VBS= 1.294 compris entre [0.2 ; 2.5] notre échantillon est peu plastique et sensible à l'eau.

### **2.1.4 Poids spécifiques au pycnomètre à air**

❖ **But**

Cet essai nous permet de déterminer le poids volumique des grains solides des matériaux.

❖ **Principe de l'essai**

Les matériaux sont pris directement sans lavage, chaque échantillon est pesé entre 600g et 900g directement dans le pycnomètre taré sur la balance, ensuite on ajoute de l'eau distillée en quantité supérieure à 300 cm<sup>3</sup>, l'appareil est refermé puis on injecte de l'air à l'aide d'une petite pompe qui se trouve sur l'appareil, ensuite l'aiguille est ramenée au point rouge et on fait la lecture de la pression.

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

**Tableau 6: Résultats de poids spécifique**

POIDS SPECIFIQUE				
Désignation	Latérite CC3D essai 1	Latérite CC3D essai 2	Chaux éteinte essai 1	Chaux éteinte essai 2
Valeurs	2,92	2,75	2,55	2,45
Ecart type	0,12		0,07	
Moyenne	2,835		2,500	

**Tableau 7: Récapitulatif des essais d'identification des matériaux**

DESIGNATION		VALEURS	MOYENNE	ECART TYPE
<b>ANALYSE GRANULOMETRIQUE</b>	<b>Sable (%)</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>Néant</b>
	<b>Limon (%)</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	
	<b>Argile (%)</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	
<b>BLEU DE METYLENE</b>	<b>Latérite</b>	<b>1,455</b>	<b>1,294</b>	<b>0,23</b>
		<b>1,132</b>		
<b>LIMITES D'ATTERBERG</b>	<b>Limite Liquidité (%)</b>	<b>47,50</b>	<b>47,50</b>	<b>Néant</b>
	<b>Limite Plasticité (%)</b>	<b>20,80</b>	<b>20,80</b>	
	<b>Indice de Plasticité</b>	<b>26,70</b>	<b>26,70</b>	
<b>POIDS SPECIFIQUE (KN/m3)</b>	<b>Latérite</b>	<b>2,92</b>	<b>2,84</b>	<b>0,11</b>
		<b>2,76</b>		
	<b>Chaux éteinte</b>	<b>2,55</b>	<b>2,50</b>	<b>0,07</b>
		<b>2,45</b>		
<b>MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (Kg/l)</b>	<b>Latérite</b>	<b>1,1816</b>	<b>1,180</b>	<b>0,00</b>
		<b>1,1801</b>		
		<b>1,1796</b>		
	<b>Chaux éteinte</b>	<b>0,5774</b>	<b>0,575</b>	<b>0,01</b>
		<b>0,5807</b>		
		<b>0,5674</b>		

### 2.2 Etudes des propriétés des BTC stabilisés à la chaux éteinte

### 2.2.1. Propriétés physiques

#### 2.2.1.a Densité Apparente

##### ❖ Dimensions et volume

La taille d'un bloc ne correspond pas exactement à la dimension nominale du bloc de moule de la presse. Lors du retrait du bloc, un effet «effondrement» peut se produire sur les arêtes. Ainsi, la longueur, la largeur et la hauteur du bloc peut ne pas être constante. Chaque face du bloc doit donc être mesurée. Chaque dimension du bloc a été mesurée au millimètre près. Cela a été fait au milieu de chaque face afin de calculer les moyennes. Le volume du bloc a ainsi été calculé à partir de l'expression suivante:  $V = L \times P \times H$  (en  $\text{cm}^3$ ).

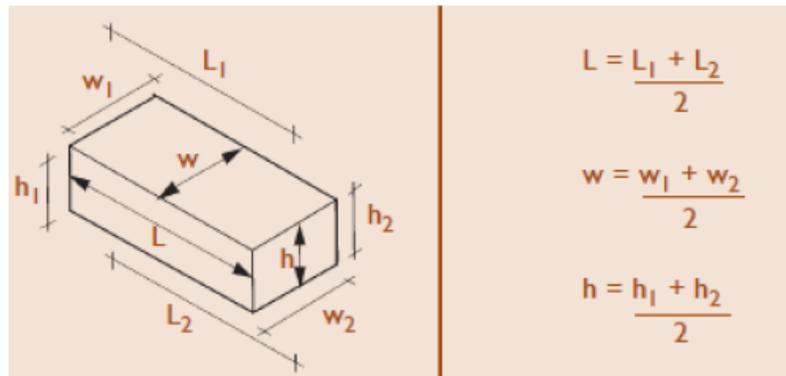


Figure 7: Mesures des dimensions des blocs

##### ❖ Masse

Après séchage à l'étuve, La masse du bloc est considérée constante lorsque les différences de masse entre 2 pesées (à intervalles de 24 heures) ont été  $< 0,1\%$  de la masse initiale. Dès la sortie du four, le bloc a été exposé à des conditions de l'air ambiant pendant quelques jours. Il a ensuite été pesé avec une balance (faite par EUROMATEST, France, le nombre de série: 087 790 224) pour déterminer la masse  $M$  (en g, au gramme près).

##### ❖ Expression des Résultats

La densité apparente  $\rho_a$  en g/cm<sup>3</sup> est définie comme le quotient de la « masse sèche » ( $M_d$ ) au volume apparent ( $V_a$ ) occupé par les matières solides et les vides contenus dans les grains. Ceci permet d'obtenir une indication de l'ampleur de compactage du bloc. Cela nécessite des mesures précises de son volume et de masse. La masse volumique apparente

est donnée par : 
$$\rho_a = \frac{M_d}{V_a}$$

### **2.2.1.b : Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau (Normes ARS 674...)**

Les BTC qui sont utilisés dans une structure peuvent être soumis à des phénomènes d'absorption et de désorption. Dans la plupart des cas, c'est à cause d'un "environnement capillaire» dans lequel une remontée capillaire se produit.

#### **❖ Principe du test**

Dans ce test, le matériau est partiellement immergé sur une hauteur de 5mm. La condition doit être telle que le bloc est toujours immergé à la même hauteur. Cette valeur est plus représentative du comportement de la maçonnerie soumis à un violent orage que sa capacité d'absorption mesurée à la saturation. Il correspond à la capacité d'absorption à saturation d'un bloc dans une situation d'absorption capillaire au bout de plusieurs jours. Toutefois, le coefficient d'absorption indique la vitesse de l'absorption d'un bloc après 10 minutes.

#### **❖ Mode opératoire**

Avant de commencer l'essai, les échantillons sont séchés à l'étuve à 50°C pendant 24h pour avoir leur masse sèche ( $M_d$ ). Les échantillons sont ensuite immergés pendant 5mm, comme décrit ci-dessus. L'immersion a été réalisée en déposant l'échantillon sur des tamis de grandes mailles qui étaient placés au fond d'un bac rempli d'eau. Un flacon rempli d'eau est placé de sorte que le niveau d'eau reste constant dans le bac. Après 10 minutes, le bloc est retiré de l'eau et essuyé avec un chiffon humide. Le bloc est tout de suite pesé pour obtenir sa masse humide ( $M_w$ ).

Pour la capacité d'absorption d'eau, l'échantillon est submergée entièrement dans l'eau pendant 24h afin d'obtenir la masse d'eau contenue dans l'échantillon total.

❖ **Expression des résultats**

Le coefficient d'absorption d'eau capillaire de chacun des blocs est donnée par :

$$C_{ab} = 100 \frac{(M_w - M_d)}{S\sqrt{t}} \text{ et } W\% = 100 \frac{(M_f - M_d)}{M_i} \text{ où :}$$

- ✓  $(M_w - M_d)$  : masse de l'eau, exprimée en grammes, absorbée par le bloc au cours de l'essai,
- ✓  $S$  : surface spécifique de la surface immergée, en  $\text{cm}^2$ ,
- ✓  $t$  : temps d'immersion du bloc, en min.
- ✓ **Cab** : absorption capillaire ;
- ✓ **Mf** : masse de l'échantillon ayant absorbé l'eau pendant 24h ;
- ✓ **W%** : capacité d'absorption d'eau ;
- ✓ **M<sub>i</sub>** : masse initiale de l'échantillon.



**Figure 8: Dispositif d'essai d'absorption capillaire**

**2.2.2 Propriétés mécaniques**

**2.2.2.a Essais de compression sèche et humide**

❖ **But**

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des briques. Les briques sont écrasées à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la construction. La presse mécanique du laboratoire Eco-Matériau de Construction du 2iE a été utilisée pour cet essai d'écrasement.

### ❖ Principe

Il s'agit de soumettre un échantillon de bloc à une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de déterminer la résistance nominale en compression sèche et humide des blocs de terre compressée.

### ❖ Mode opératoire :

Poser l'échantillon de BTC entre les plateaux de la presse. Appliquer la charge d'une manière continue et ce, avec une vitesse de 0,05mm/s régulière jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Relever la charge maximale supportée par l'échantillon au cours de l'essai.

**NB** : la compression humide est faite après deux heures d'imbibition des échantillons dans l'eau.

### ❖ Expression des résultats

La résistance à la compression des blocs est donnée par la formule :  $R_c = 10 \frac{F}{S}$  avec :

- ✓ **R<sub>c</sub>** : résistance à la compression en MPa
- ✓ **F** : charge maximale supportée par les deux briques en kilo newtons (KN)
- ✓ **S** : surface moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm<sup>2</sup>)

La résistance en compression des blocs est la moyenne arithmétique des résistances d'au moins trois essais réalisés sur des échantillons d'un même lot. L'équipement d'essai est illustré à la figure 9.



**Figure 9: Essai de compression**

### 2.2.2.b Essai de flexion

#### ❖ But

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

#### ❖ Principe de l'essai

Le BTC test est posé (sur une de ces grandes faces) sur deux appuis espacés d'une distance  $l_0$  et perpendiculairement à la longueur du bloc. Dans l'axe au-dessus du bloc, parallèle au petit côté, on pose un autre appui surmonté d'un plateau sur lequel sera exercée une force croissante jusqu'à la rupture du bloc testé. On obtient une valeur de rupture en flexion. Multiplié par cinq, cette valeur indique la résistance en compression minimale. L'équipement d'essai (le portique universel) est illustré à la figure 10.

#### ❖ Expression des résultats

La résistance à la flexion des blocs est donnée par la formule :  $R_f = \frac{3Fl_0}{2bh^2}$  avec :

- ✓ **F** : charge à la rupture de la brique en flexion en KN ;
- ✓  **$l_0$**  : distance séparant les deux appuis en mm ;
- ✓ **b** : épaisseur de la brique en mm ;
- ✓ **h** : hauteur en mm ;
- ✓  **$R_f$**  : résistance à la flexion en MPa



Figure 10: Essai de flexion

2.2.2.c Essai ultrasonique (Le module de Young dynamique) (Norme NF P 18.418)

C'est un essai non destructif très important qui consiste à mesurer la vitesse du son dans la brique à l'aide d'un **testeur de vitesse ultrasonique à impulsion (CONTROLS)** comportant une boîte de mesure, un émetteur et un récepteur des ondes. Le principe de l'essai (figure 11) consiste à presser les deux têtes de mesure sur les deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface de la brique doit être raisonnablement plane et bien nettoyée. Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microsecondes. La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante :  $V = \frac{L}{T}$

Où V est la vitesse de propagation en km / s, L est la longueur du trajet en mm, T est le temps pris par l'impulsion transversale à la longueur, en ms.

A partir de la vitesse des ondes ultrasonores, il est possible de déterminer et de comparer le module d'élasticité dynamique ED des différentes formulations données :

$$ED = V^2 \rho \frac{(1+n)(1-2n)}{(1-n)}$$

Où V est la vitesse de propagation en km / s, ρ est la masse volumique en kg/m<sup>3</sup>, n est le ratio de Poisson.



Figure 11: essai de Poundit

2.2.3. Propriétés Thermiques.

La conductivité K (W / mK), la diffusivité thermique D (mm<sup>2</sup> / s), et la chaleur spécifique CP (MJ / m<sup>3</sup> K) sont les propriétés thermiques testés dans cette étude à pression constante. « KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, France » a été utilisée pour établir

---

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

---

ces paramètres. Concrètement, les échantillons ont été analysés à l'aide d'une double aiguille SH-1 capteur.

### ❖ Principe de l'essai

Une fois le KD2 Pro est allumé, le capteur est correctement insérée dans l'échantillon et doit être mesuré à travers 2 trous percés dans le matériau avec une mince pointe. Après environ 5 minutes, lorsque la barre de progression a complètement assombri, les résultats sont affichés sur l'écran. L'équipement d'essai est illustré à la figure 12.



**Figure 12: Appareil KD2 Pro**

## Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1. Propriétés physiques

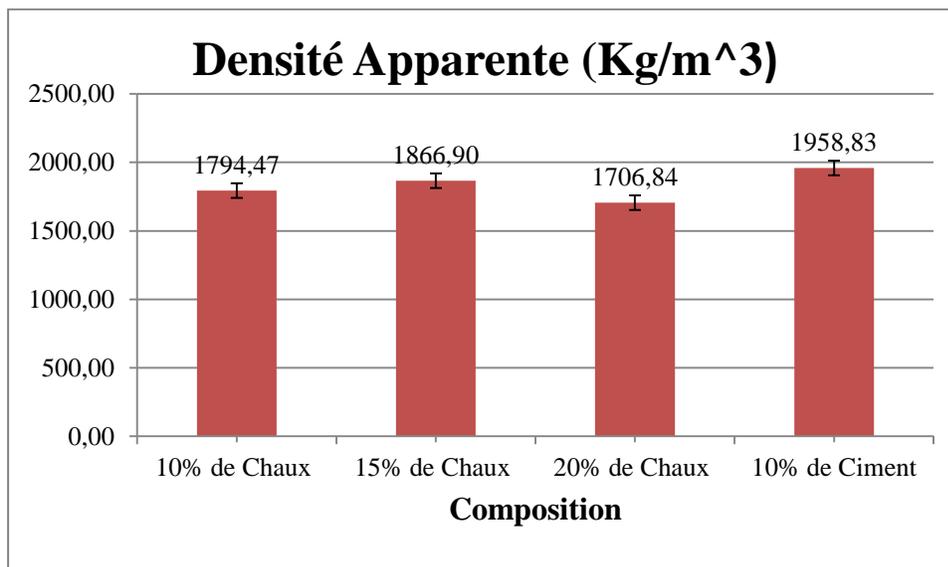
#### 3.1.1. Densités apparentes

##### 3.1.1.a Résultats

Les densités apparentes des différentes formulations sont résumées dans le tableau 9. Les tendances sont aussi présentées à la figure 13.

**Tableau 8: Résultats de densité apparente**

Densité apparente		
Composition	Moyenne (Kg/m <sup>3</sup> )	Ecart type
10% Chaux éteinte	1794,47	0,051415
15% Chaux éteinte	1866,90	0,005115
20% Chaux éteinte	1706,84	0,032747
10% Ciment	1958,83	0,015916



**Figure 13: Représentation graphique de la densité apparente**

##### 3.1.1.b Analyse et Interprétation

## **Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte**

Ces résultats montrent que toutes les formulations aboutissent à des matériaux plus ou moins denses. Les différences observées entre les différentes densités sont très légères. Elle varie de 1.79 g/cm<sup>3</sup> pour les échantillons stabilisés à 10% de chaux éteinte à 1.87 g/cm<sup>3</sup> pour les BTC à 15% de chaux éteinte. La haute densité de ce dernier est due principalement à la bonne cohésion de terre et le processus de stabilisation à la chaux éteinte. Néanmoins, une légère diminution de la densité est observée lorsque le pourcentage de chaux éteinte atteint 20%. Cela montre que la masse volumique du matériau est sensible à la quantité de stabilisant « Chaux éteinte ». L'échantillon stabilisé au ciment a également permis d'améliorer la densité, bien que 15% de stabilisation a donné un résultat très acceptable.

### **3.1.2 Absorption capillaire et capacité d'absorption**

#### **3.1.2.a résultats**

Les tests d'absorption capillaire et de capacité d'absorption sont des approximations raisonnables à ce qui se passe dans la réalité. En revanche les blocs sont rarement submergés. Le seul avantage de la méthode d'immersion, c'est qu'il est simple à réaliser. Les résultats sont présentés dans le Tableau 10 et figure 14.

**Tableau 9: Résultats de capillarité et d'absorption d'eau**

Composition	Absorption capillaire		Absorption d'eau en 24h	
	Moyenne (%)	Ecartype	Moyenne (%)	Ecartype
10% Chaux éteinte	7,27	1,20	9,23	0,47
15% Chaux éteinte	5,88	0,27	9,29	1,30
20% Chaux éteinte	5,46	0,57	9,57	0,70
10% Ciment	1,61	0	10,73	2,31

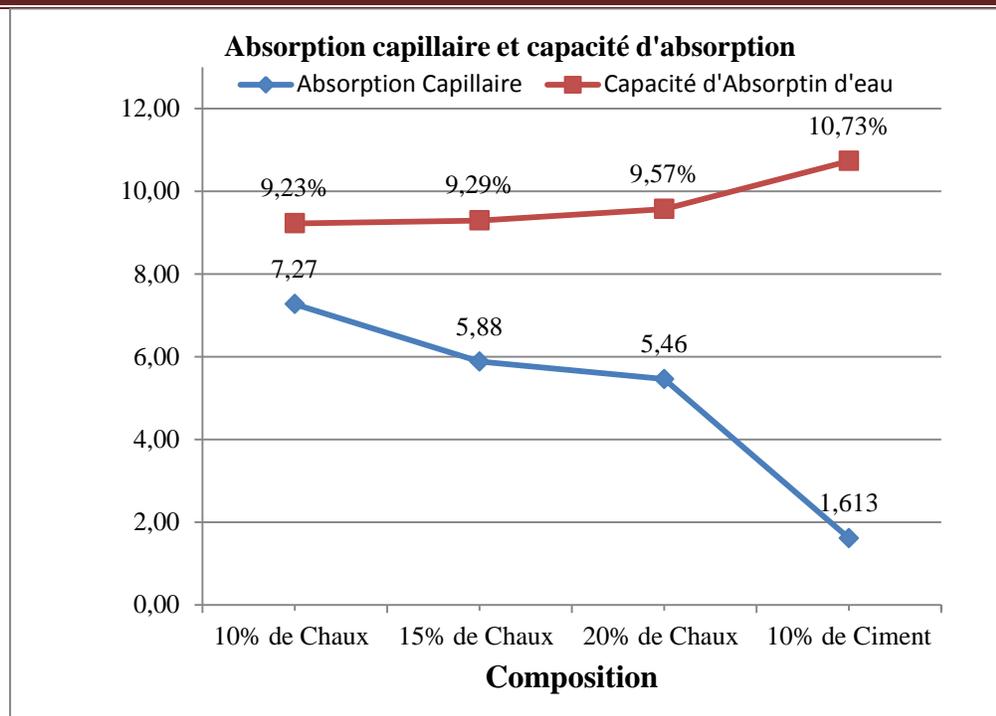


Figure 14: Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau

### 3.1.2.b Analyse et Interprétation

Les résultats montrent qu'il existe de grandes différences entre les résultats obtenus à partir des méthodes de submersion et de capillarité. Ces deux résultats présentent des tendances contraires en fonction des compositions de la matrice. Pour une stabilisation à 10, 15 et 20% de chaux éteinte, le pourcentage d'absorption capillaire décroît respectivement 7.27, 5.88 et 5.46% par contre la capacité d'absorption d'eau croît de façon exponentielle (9.23% à 9.57%) pour ces mêmes dosage en chaux éteinte. Cependant pour une stabilisation au ciment, les échantillons de BTC présentent un faible pourcentage pour l'absorption capillaire (1.613%) et la plus grande valeur pour la capacité d'absorption d'eau (10.73). La stabilisation à la chaux éteinte a donné lieu à un matériau plus compact et moins poreux. Ceci est en accord avec la densité apparente élevée des échantillons stabilisés à la chaux éteinte. D'autre part, la plus grande valeur de la capacité d'absorption d'eau observée avec les échantillons de BTC stabilisé au ciment peut s'expliquer par l'existence de nombreux pores. La raison à cela est que le volume total des vides (ou pores) dans un bloc est étroitement liée à la quantité d'eau qu'il peut absorber.

**3.2. Propriétés mécaniques**

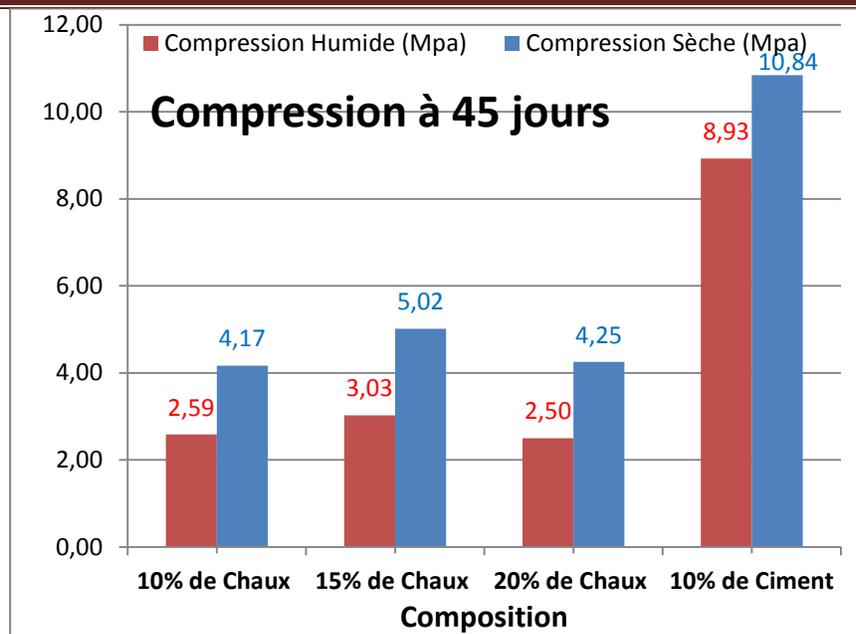
**3.2.1 Résistance à la compression sèche et humide**

**3.2.1.a résultats**

La résistance à la compression est souvent utilisée pour confirmer le potentiel des blocs stabilisés. Les résistances à la compression des blocs sèches et humides à l'âge de la maturité de 45 et 70 jours sont présentées respectivement dans les tableaux 10 et 11. Les tracés des données sont aussi présentés aux figures 15 et 16.

**Tableau 10: Résultat de compression sèche et humide à 45 jours**

Compression simple à sec à 45 jours de cure					
Désignation	Force Maximale (KN)	Ecartype sur la force	surface (cm <sup>2</sup> )	R <sub>c</sub> (MPa)	Ecartype
10 % Chaux éteinte	81,67	2,36	196	4,17	0,12
15 % Chaux éteinte	98,33	2,36	196	5,02	0,12
20 % Chaux éteinte	83,33	2,36	196	4,25	0,12
10 % Ciment	212,50	2,5	196	10,84	0,13
Compression simple humide à 45 jours de cure					
10 % Chaux éteinte	50,67	0,94	196	2,59	0,05
15 % Chaux éteinte	59,33	0,94	196	3,03	0,05
20 % Chaux éteinte	49,00	1,41	196	2,50	0,07
10 % Ciment	175	1,23	196	8,93	0,06



**Figure 15: Représentation de la compression sèche et humide à 45 jours**

**Tableau 11: Résultats compression sèche et humide à 70 jours**

<b>Compression simple sèche à 70 jours de cure</b>					
Désignation	Force Maximale (kN)	Ecartype sur la force	surface (cm <sup>2</sup> )	Resist à la compression (MPa)	Ecartype
10 % Chaux éteinte	98,50	1,50	196	5,03	0,08
15 % Chaux éteinte	155,00	5,00	196	7,91	0,26
20 % Chaux éteinte	132,50	2,50	196	6,76	0,13
10 % Ciment	212,50	0	196	10,84	0,00
<b>Compression simple humide à 70 jours de cure</b>					
10 % Chaux éteinte	57,50	2,50	196	2,93	0,13
15 % Chaux éteinte	77,50	2,50	196	3,95	0,13
20 % Chaux éteinte	62,50	2,50	196	3,19	0,13
10 % Ciment	175,00	0,00	196	8,93	0,00

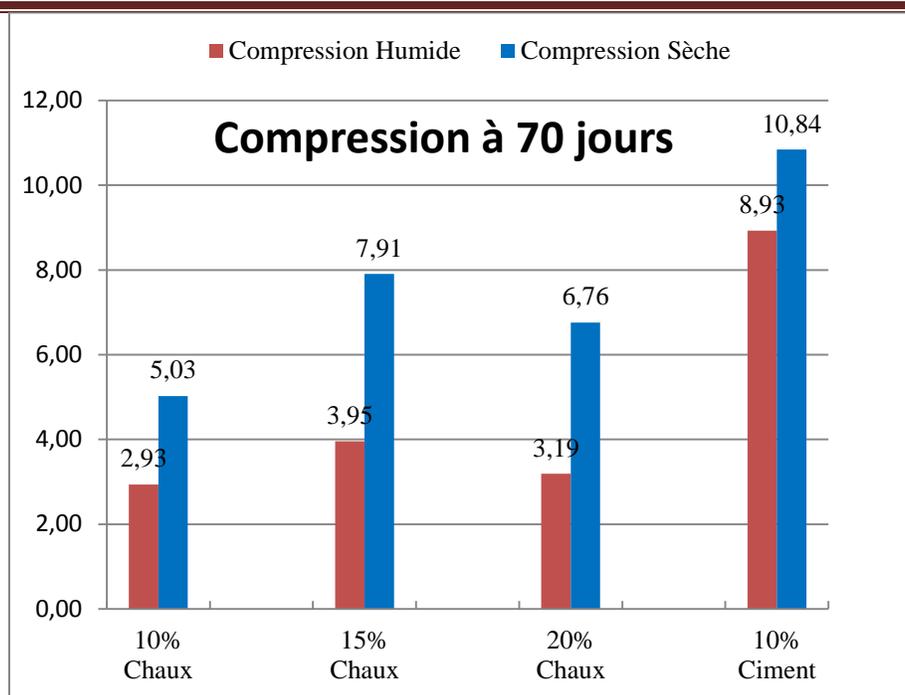


Figure 16: Représentation graphique des essais de compression sèche et humide à 70 jours

### 3.2.1.b Analyse et Interprétation

Les résultats d'écrasement des BTC observé dans les tableaux 10, 11 et figures 14,15 à 45 et 75 jours de cure ont confirmé que la chaux éteinte est un bon stabilisant pour les BTC. À travers les figure ci-dessus on remarque que pour une stabilisation de 10%, 15% et 20% on a des résistances à la compression sèche à 75 jours (45 jours) respectives de 5.03 (4.17), 7.91 (5.02), 6.76 (4.25) MPa et pour la stabilisation de 10% de ciment on a 10.84 MPa. En ce qui concerne les résistances à la compression humides, elles ont été au moins égale à la moitié de la résistance à la compression sèche. Les résultats montrent que toutes les formulations ont abouti à une stabilisation efficace ( $R_c > 4\text{MPa}$ ). La valeur optimale de compression est obtenue avec un dosage de 15% de chaux éteinte. Cependant, les résultats d'écrasement à 28 jours de cure des travaux effectués par d'autres étudiants (B. SAKINE, 2012 et L. A. OUEDRAOGO, 2012) étaient inférieurs à 4MPa pour toute stabilisation effectuée. Au vue de cela nous pouvons donc conclure que l'augmentation des résistances à la compression est fonction du temps de cure et du taux de dosage. Mais le dosage optimum pourrait se limité à 15% de chaux éteinte.

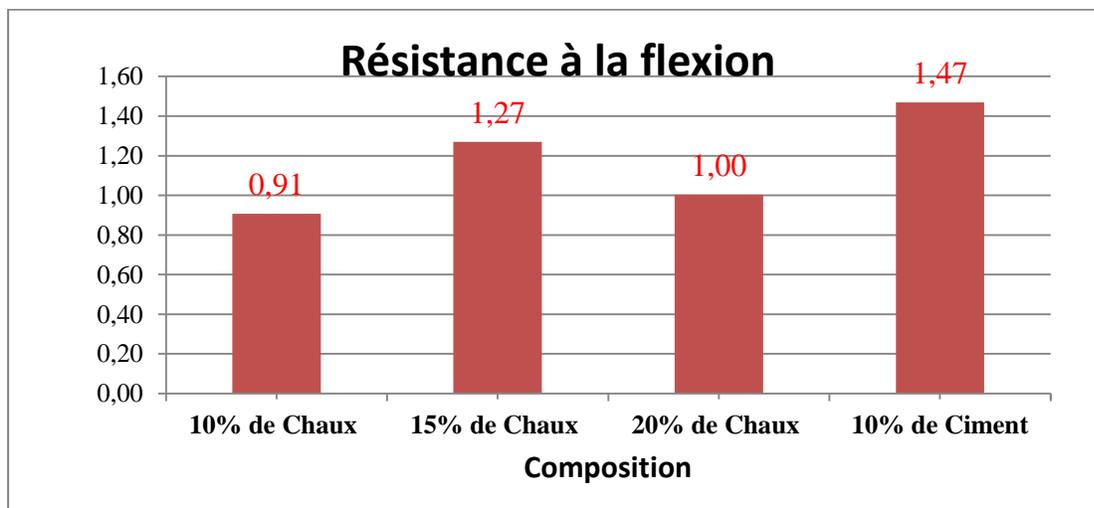
### 3.2.2 Résistance à la flexion

#### 3.2.2.a Résultats

Les résultats d'essai de flexion sont présentés dans le Tableau 12. La figure 16 illustre également les tracés de résistance à la flexion en fonction de la composition de la matrice.

**Tableau 12: Résultats de flexion trois points**

Résistance à la flexion				
Composition	Force (KN)	Ecartype	Rf (MPa)	Ecartype
10% Chaux éteinte	3,92	0,10	0,91	0,91
15% Chaux éteinte	5,48	0,06	1,27	0,01
20% Chaux éteinte	4,33	0,08	1,00	0,02
10% Ciment	6,35	0,23	1,47	0,05



**Figure 17: Représentation graphique de flexion trois points**

#### 3.2.2.b Analyse et Interprétation

Comme le témoigne le tableau 12 et la figure 16 ci-dessus, on observe un accroissement général de la résistance à la flexion des briques en fonction du dosage. Pour une stabilisation à la chaux éteinte, la résistance à la flexion des briques croît progressivement. La résistance moyenne maximale est atteinte avec une teneur de 15% de chaux éteinte soit 1,27MPa. Par contre, la

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

résistance à la flexion des BTC stabilisés au ciment reste plus élevée soit 1.47MPa. Si l'on retient cette dernière valeur comme valeur de référence, on peut affirmer que la résistance à la flexion des briques augmente en fonction du dosage. Cependant, il est possible d'améliorer ces résistances par réduction de la granulométrie des matériaux (latérite et stabilisant broyés très finement). De telles méthodes peuvent réduire la taille des pores, et réduire ainsi la sensibilité à l'échec dans les régions de l'échantillon qui sont chargés en traction. Enfin, il est important de noter que les effets de ces pores et les contraintes de traction peuvent expliquer la faible résistance des BTC aux forces de flexion.

### 3.2.3 Module de Young (Vitesse de propagation)

#### 3.2.3.a Résultats

Les résultats des tests de vitesse des ultrasons sont présentés dans le Tableau13 et figure 17.

**Tableau 13: résultats de vitesse de propagation**

Vitesse de Propagation			
Composition	Temps (us)	L (mm)	vitesse (Km/s)
10% Chaux éteinte	75.43	140	1856.88 ± 41.56
15% Chaux éteinte	67.97	140	2060 ± 18.59
20% Chaux éteinte	72.23	140	1938.38 ± 20.46
10% Ciment	56.40	140	2458.16 ± 70.47

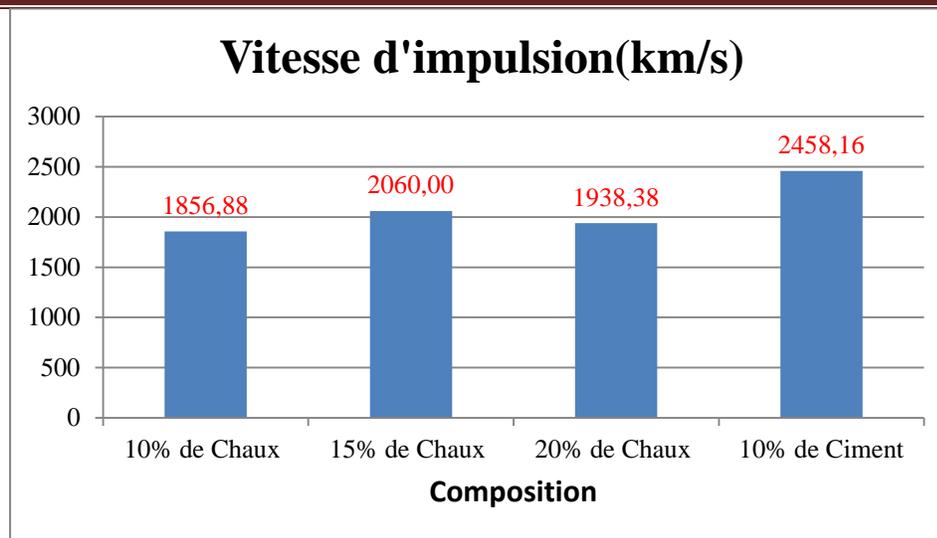


Figure 18: Représentation graphique des vitesses de propagation

### 3.2.3.b Analyse et Interprétation

Le module de Young dynamique (ED) de chaque bloc a été apprécié en utilisant la vitesse de propagation ( $v$ ), parce que les deux paramètres (ED et  $v$ ) sont proportionnels. Les résultats des tests de vitesse des ultrasons sont présentés dans le Tableau 13 et la figure 16 présentent les résultats graphiques des vitesses de propagation. D'après les résultats, on peut constater que les vagues ont pris le plus de temps à voyager à travers les échantillons stabilisés à 10% de ciment (2458.16 km / s), suivi respectivement par 15% chaux éteinte (2060 km/s), 20% de chaux éteinte (1938.38Km/s) et enfin 10% de chaux éteinte (1856.88Km/s). Cependant, le temps mis par le signal pour passer à travers l'échantillon constitué 10% de chaux éteinte a été révélée être la plus longue. De cette analyse, on peut souligner que les BTC à 15% de chaux éteinte posséderont une plus grande résistance à la déformation élastique que les autres formulations. En revanche, à 10% de stabilisation à la chaux éteinte, les blocs vont probablement présenter un comportement élastique inappréciable (faible ED). Autre information qui peut être retirée de ces résultats est le contenu et la distribution à travers les échantillons défauts. En effet, quand une impulsion ultrasonore traversant un échantillon rencontre une interface solide-air, il existe une transmission négligeable de l'énergie à travers cette interface (en raison de la diffraction et de réflexion) de sorte que le temps de passage soit nécessairement plus long que dans un matériau similaire, sans

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

défauts. Ceci suggère que l'échantillon contenant 15% de chaux éteinte avait le moins de contenu des régions dégradées.

### 3.3 Propriétés thermiques

#### 3.3.1 Résultats

Le tableau 14 présente les résultats de la conductivité, diffusivité et la capacité de chaleur spécifique à des mesures constantes. La figure 18 donne une représentation graphique des résultats.

**Tableau 14: Résultats des propriétés thermiques**

Propriétés Thermiques			
Composition	K(w/m.K)	C(MJ/m <sup>3</sup> .K)	D(mm <sup>2</sup> /s)
10% Chaux éteinte	1.05 ± 0.13	2.66 ± 0.79	0.72 ± 0.5
15% Chaux éteinte	1.01 ± 0.16	2.50 ± 0.39	0.41 ± 0.05
20% Chaux éteinte	1.11 ± 0.03	2.34 ± 1.09	1.03 ± 0.22
10% Ciment	1.12 ± 0.06	3.21 ± 1.11	0.38 ± 0.14

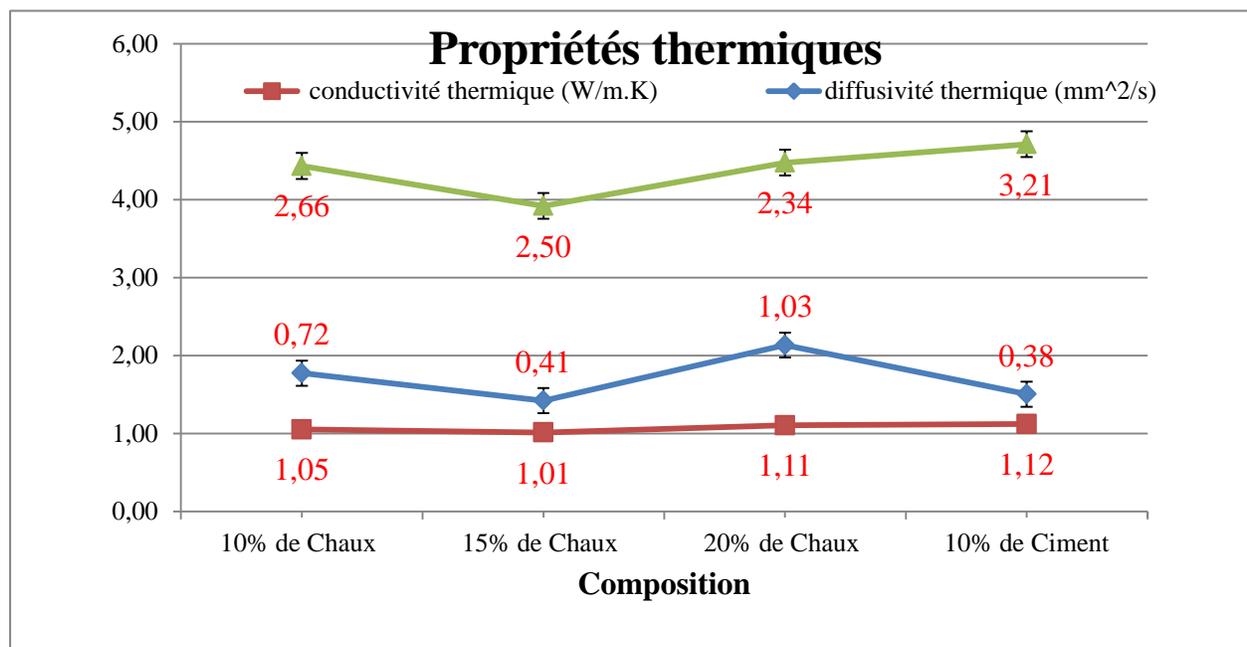


Figure 19: Représentation graphique des propriétés thermiques

### 3.3.2 Analyse et Interprétation des résultats

Le transfert de chaleur se fait essentiellement au niveau des points de contact entre les grains formant le matériau, d'où la faible augmentation de la valeur de la conductivité thermique. Ces trois paramètres thermiques suivent une évolution contraire des paramètres mécaniques, la stabilisation à 15% qui semblerait avoir les valeurs optimales pour ces paramètres thermiques affiche au contraire les valeurs minimales pour ces derniers paramètres. Otis (2009) a observé que ces paramètres thermiques sont fonction de la densité du matériau et de l'humidité. Les résultats montrent que la chaleur spécifique la plus élevée a été fournie par l'échantillon stabilisé à 10% de ciment (3.21MJ/m<sup>3</sup>.K) suivi de près par 10% de stabilisation à la chaux éteinte. De plus, la faible conductivité thermique (1.01 W / mK) a été offerte par 15% de stabilisation à la chaux éteinte, alors que les échantillons stabilisés au ciment avaient une conductivité plus élevée (1,12 W / mK). Les diffusivités thermiques varient de 0.41 à 1.03 mm<sup>2</sup>/s pour la stabilisation à la chaux éteinte et 0.38 mm<sup>2</sup>/s (plus faible valeur) pour la stabilisation au ciment. Par conséquent, la haute densité et le pourcentage de faible absorption d'eau des blocs stabilisés avec 15% de

### **Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte**

---

chaux éteinte sont compatibles avec leur conductivité relativement faible. En outre, l'échantillon avec 15% de chaux éteinte a une combinaison attrayante de faible conductivité thermique et la capacité de stockage d'énergie plus ou moins élevée. Cela peut conduire à l'efficacité, la réduction des coûts de l'énergie de chauffage en hiver et la climatisation en été.

## Chapitre 4 : IMPORTANCE DES BTC

Les briques de Terre Comprimé affichent une grande importance tant sur plusieurs domaines à savoir sur le domaine de Développement durable, Ecologique, Sanitaire, Esthétique et Economique. Cependant, les BTC présentent d'une part quelques inconvénients.

### 4.1 Développement durable

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années. Souvenez-vous de la grande muraille de Chine, des pyramides aztèques ou encore des casbahs marocaines. Sa transformation en matériau pour l'habitat ne nécessitant que peu d'énergie et sa disponibilité quasi immédiate, lui confèrent encore aujourd'hui un succès incontestable. Elles sont facilement recyclables et transformables en matériau de construction. De ce fait, il est indubitable que les briques en blocs de terre comprimée participent au développement durable.

### 4.2 Ecologique

Ce terme écologique que nous avons tant voulu faire ressortir par là réside entre autres :

La terre utilise peu d'eau en phase de transformation, elle est une ressource locale abondante et renouvelable. La terre a des vertus thérapeutiques, soigne les affections de la peau, détruit les bactéries et les acariens. La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie employée dans une construction en béton et n'entraîne pas des déchets indésirables lorsque l'ouvrage est à détruire.

### 4.3 Sanitaire

De la matière première au produit fini « BTC » il n'y a aucune émission de gaz à effet de serre, et leurs fabrications ne nécessitent pas l'utilisation des composantes chimiques nocives et radioactives. Une étude a démontré que l'utilisation du ciment représente 5% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> pour sa fabrication (.Hugo Houben, Hubert Guillaud GRATERre-EAG, 1995) Mais construire en matériaux locaux est capable d'engendrer des insectes malsains car ces matériaux souvent de forme irrégulière, font apparaître sur le mur bâti des poches. Ces insectes,

sans doute nuisible pour notre bien-être. Donc en choisissant de construire avec ces matériaux locaux, on limite l'émission des gaz (CO<sub>2</sub>). En conclusion ces matériaux participent à la protection de l'environnement.

### **4.4 Confort et esthétique**

La construction des bâtiments à base des briques en terre comprimée assure à l'homme un certain confort et une part importante d'esthétique des bâtiments en bloc de terre comprimée qui permettent entre autres :

L'atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques dans les bâtiments, grâce à une grande inertie thermique du matériau ; l'autorégulation du taux d'humidité à l'intérieur des réalisations grâce aux matériaux locaux ; l'esthétique de constructions très appréciées.

Tout ceci est par opposition à la construction en aggloméré de ciment qui elle ne constitue pas une isolation à la chaleur.

### **4.5 Economique**

Pour nous assurer que construire en BTC est plus économique que les briques en ciment nous avons adopté de faire une étude comparée de devis quantitatifs et estimatifs sur un bâtiment à usage de bureau (deux bureaux et une salle d'attente). A l'issue de cette étude, il ressort que le bâtiment en BTC coûtera environ 9 051 678 f CFA et le bâtiment en briques ordinaire en ciment coûtera 10 979 718 f CFA. On déduit alors que le bâtiment en BTC est plus économique que le bâtiment en ciment. La différence fondamentale réside sur l'enduit des murs. Il faut noter que le bâtiment en BTC ne nécessite pas d'enduit contrairement au bâtiment en brique creuse de 15cm.

### **4.6 Inconvénients**

La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante : même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler. La fabrication des briques est longue, fatigante et leur fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite, se détériore sous l'effet du gel.

## **CONCLUSION**

Ce présent mémoire est le résultat d'un travail d'équipe, patient et méthodique, mené au sein du Laboratoire Eco – Matériaux de Construction de 2IE. La stabilisation à la chaux éteinte augmente les caractéristiques physico – mécanique et thermique des BTC en vue de les rendre plus pratiques dans la construction des habitations. Ainsi la résistance à la compression à 21 jours de cure obtenue avec une stabilisation à 10% de ciment est égale à 10.84 MPa alors que les briques stabilisées à 15% de chaux éteinte à 45 jours de cure ont environ la moitié de la résistance à la compression des BTC stabilisés au ciment soit de 5.02MPa. Quant à la résistance à la flexion, les résultats d'essai à 45 jours de cure donnent 0.91, 1.27 et 1 MPa pour les dosages respectifs de 10%, 15% et 20% de chaux éteinte et 1.47 MPa pour 10% de stabilisation au ciment. Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que l'ajout de stabilisant (la chaux éteinte ou ciment) améliore remarquablement les caractéristiques mécaniques du matériau. Par ailleurs, les briques stabilisées à 15% de chaux ont obtenu la faible conductivité thermique (1.01 W/m.K), la chaleur spécifique (2.50 MJ/m<sup>3</sup>.K) et la diffusivité thermique (0.41 mm<sup>2</sup>/s). Nous pouvons donc dire que la limite de stabilisation des BTC à la chaux éteinte est fixée à un dosage de 15%.

Par ailleurs les résultats que nous avons eus après ces travaux sont satisfaisants aux attentes car ils sont plus ou moins égaux aux normes prévus et aux résultats obtenus par d'autres études effectuées (J.E. OTI, J.M. Kinuthi 2009). Cela peut s'expliquer éventuellement par le fait qu'on a prolongé le temps de cure à 45 jours contrairement à des études antérieures qui l'ont limité à 28 jours et la qualité de terre utilisée (pourcentage de fines présentes dans la latérite).

Nous recommandons pour les futures recherches, que les chercheurs orientent leurs études sur les propriétés thermiques et hydriques des BTC. Il faut aussi augmenter « l'âge » d'écrasement de 3 à 6 mois des BTC stabilisées pour permettre la prise relative afin de bien apprécier la résistance.

**BIBLIOGRAPHIE**

1. Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, GRATerre- EAG, Blocs de terre comprimée, Manuel de conception et de production. Volume II ;
2. J.E Oti, J.M. Kinuthia, 2009, engineering properties of unfired clay masonry bricks;
3. Le bloc de terre comprimée : Elément de base, CRATerre, 91 ;
4. Le bloc de terre comprimée : Equipement de production, CRATerre, 96 ;
5. Vincent Rigassi, GRATerre-EAG, Blocs de Terre Comprimée, Manuel de production Volume I ;
6. A. ELABBADI, Mécanisme de durcissement des briques en terre stabilisée à la chaux. Conditions de cure et choix des terres, Thèse de doctorat en géologie de l'ingénieur, école nationale supérieure de Paris, 1986 ;
7. Traité de construction en terre Hugo Houben, Hubert Guillaud, CRATerre-EAG ,1995 ;
8. Le bloc de terre comprimée ; YAMBA Tiémoko, Nov.1995 ;
9. La chaux, Les Routes Des Ksours, C. Abdelkalek, B. Nesma, B. Zouhir, 2.012
10. Compressed Stabilised Earth block Manufacture in Sudan, Doctor E.A. Adam, Prof A.R.A. Agib, 2001.

**ANNEXES**

Annexe 1: Analyse granulométrique par Tamisage .....	40
Annexe 2: Analyse granulométrique par sédimentometrie .....	41
Annexe 3: Courbe granulométrique et fuseau de CRATerre .....	42
Annexe 4: Essai de bleu de méthylène .....	43
Annexe 5: Limites d'Atterberg .....	44
Annexe 6: Poids spécifiques des matériaux (latérite et chaux éteinte) .....	45
Annexe 7: Densité apparente des matériaux (latérite et chaux éteinte) .....	46
Annexe 8: Densité apparente des BTC stabilisé à la chaux éteinte .....	47
Annexe 9: Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau .....	48
Annexe 10: Essais de résistance à la compression et à la flexion .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Annexe 11: Essais de Module de Young .....	50
Annexe 12: Essais de propriétés thermiques.....	51
Annexe 13: Dossier plan de Batiment temoin.....	53

**Annexe 1: Analyse granulométrique par Tamisage**

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés	Observations
50	80					
49	63					
48	50					
47	40					
46	31,5					
45	25					
44	20		0,0			
43	16		0,0			
42	12,5		0,0			
41	10		0,0			
40	8		0,0			
39	6,3	9,0	9,0	0,5%	99,6%	
38	5	11,5	20,5	1,0%	99,0%	
37	4	18,7	39,2	2,0%	98,0%	
36	3,15	16,1	55,3	2,8%	97,2%	
35	2,5	22,4	77,7	3,9%	96,1%	
34	2	22,2	99,9	5,0%	95,0%	
33	1,6	21,1	121,0	6,1%	94,0%	
32	1,25	27,0	148,0	7,4%	92,6%	
31	1	37,7	185,7	9,3%	90,7%	
30	0,8	37,4	223,1	11,2%	88,8%	
29	0,63	68,0	291,1	14,6%	85,4%	
28	0,5	98,2	389,3	19,5%	80,5%	
27	0,4	86,4	475,7	23,8%	76,2%	
26	0,315	140,8	616,5	30,8%	69,2%	
25	0,25	125,3	741,8	37,1%	62,9%	
24	0,2	103,1	844,9	42,2%	57,8%	
23	0,16	101,8	946,7	47,3%	52,7%	
22	0,125	65,2	1 011,9	50,6%	49,4%	
21	0,1	47,4	1 059,3	53,0%	47,0%	
20	0,08	45,8	1 105,1	55,3%	44,7%	
19	0,063					
18	0,050					
17	0,040					

**Module de finesse M<sub>df</sub> = 1,05**

**Le Chef Travaux Génie Civil**

**Coefficient de HAZEN C<sub>u</sub> = 457**

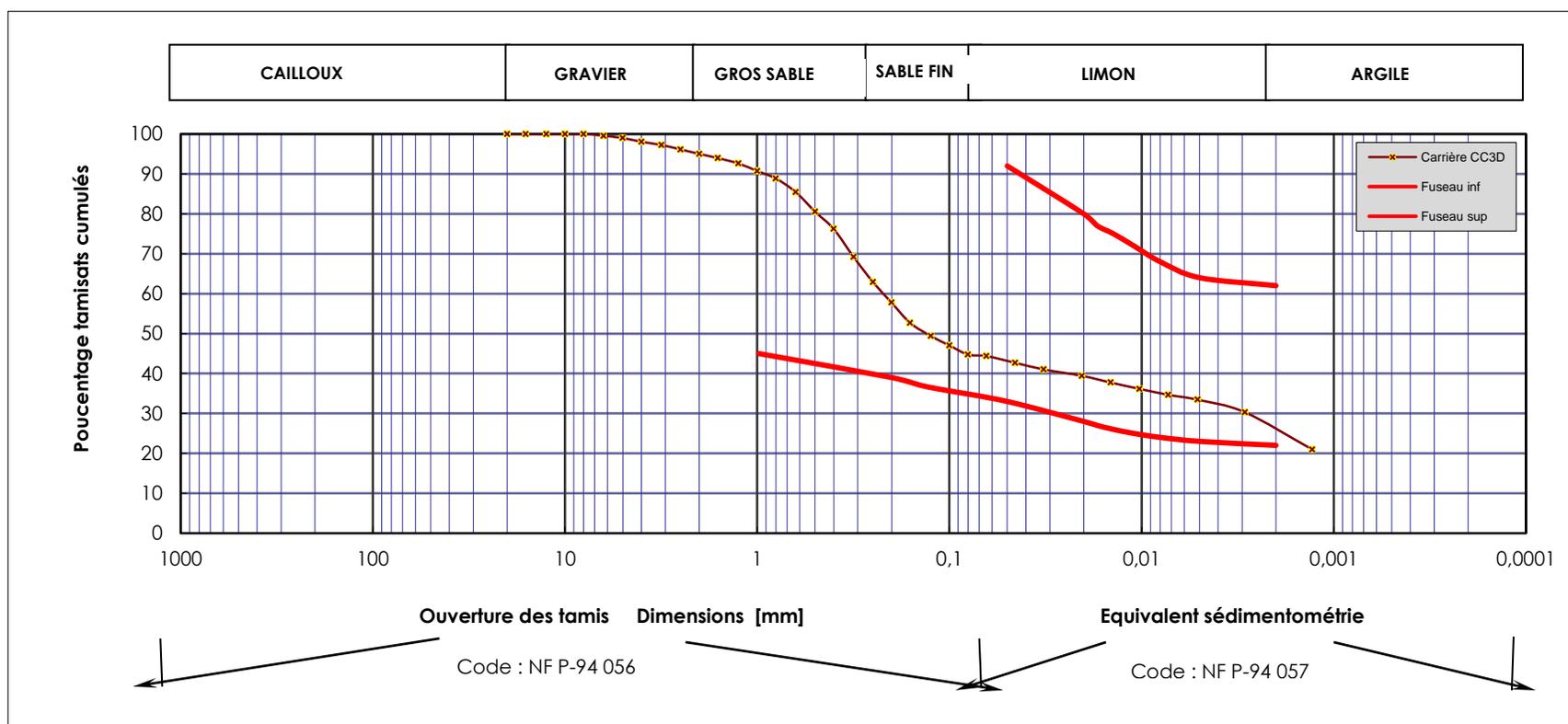
**Coefficient de courbure C<sub>c</sub> = 3,3**

**KOKOLE Koffi Agbévidé**

**Annexe 2: Analyse granulométrique par sédimentométrie**

Heures to =	Temps cumulé tc de lecture	Lecture R	Température T °c	Correction C <sub>T</sub> +C <sub>m</sub> -C <sub>d</sub>	Lecture corrigée R <sub>c</sub>	Profondeur effective Hr (cm)	Facteur F	Diamètre équivalent $\Phi$ ( $\mu$ m)	Pourcentage des grains < $\Phi$ P (%)	Passant échantillon p (p = C.P) en %
07:50:00	30 s	1011,0	28,2	2,2	1013,2	15,7	0,89	64	100,9%	44,4%
07:51:00	1 min	1010,5	28,2	2,2	1012,7	15,8	0,89	45	97,0%	42,7%
07:52:00	2 min	1010,0	28,2	2,2	1012,2	15,9	0,89	32	93,2%	41,0%
07:55:00	5 min	1009,5	28,3	2,2	1011,7	16,0	0,89	20	89,6%	39,4%
08:00:00	10 min	1009,0	28,3	2,2	1011,2	16,1	0,89	14	85,8%	37,7%
08:10:00	20 min	1008,5	28,4	2,3	1010,8	16,2	0,88	10	82,2%	36,2%
08:30:00	40 min	1008,0	28,6	2,3	1010,3	16,2	0,88	7	78,8%	34,7%
09:10:00	80 min	1007,5	29,1	2,5	1010,0	16,3	0,88	5	76,0%	33,4%
11:50:00	4 h	1006,0	31,2	3,0	1009,0	16,5	0,86	3	68,9%	30,3%
07:50:00 J+1	24 h	1005,0	24,6	1,2	1006,2	17,0	0,92	1	47,6%	21,0%

Annexe 3: Courbe granulométrique et fuseau de CRATERre

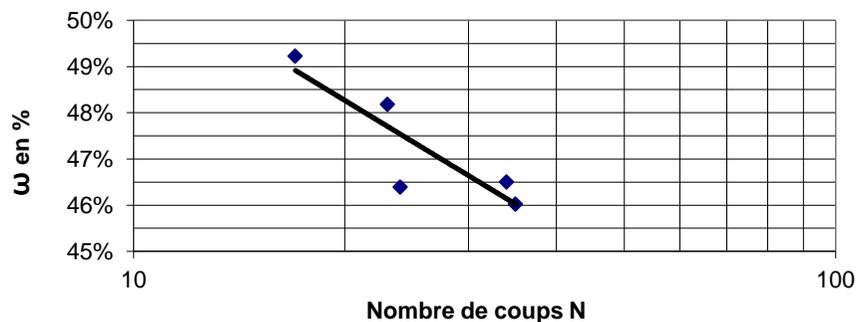


**Annexe 4: Essai de bleu de méthylène**

<b>Client :</b>		<b>Norme de réf. :</b> NF P 94-068		<b>Titrage du Bleu :</b>	
<b>Chantier :</b> Stage LEMC		<b>Remarques</b>			
<b>Opérateur :</b>		Les prises 1 et 2 se font sur la fraction 0/5 :			
<b>Date &amp; heure :</b> 04/03/13		Prendre 30 à 60 g <u>par prise</u> pour les matériaux argileux, et 60 à 120 g pour les autres.			
<b>Repère</b>		-			
<b>Sondage n° :</b>		-			
<b>Coord. :</b>	Voir plan de repérage	-			
<b>Désignations</b>		<b>Horison n°1</b>	<b>Horison n°2</b>	<b>Horison n°3</b>	
<b>IDENTIFICATION ECHANTILLON</b>		(Épaisseur .... à .... m)	(Épaisseur .... à .... m)	(Épaisseur .... à .... m)	
D <sub>max</sub> échantillon (en mm)		5 mm	5 mm	5 mm	
Masse sec du prélèvement (en g)		1 000,0 g	1 000,0 g		
Masse sec passant le tamis de 5 mm (en g)		971,7 g	971,0 g		
-> Coefficient pondérale C fraction 0/5		97,2%	97,1%		
<b>TENEUR EN EAU (prise n°2)</b>					
Poids humide prise n°2 (en g)					
Poids sec prise n°2 (en g)					
-> Teneur en eau ω du matériau					
<b>VALEUR AU BLEU VBS (prise n°1)</b>					
Masse sec 0/5 mm introduite en solution (en g)		60,0 g	60,0 g		
Volume de bleu introduit (en cm <sup>3</sup> )		90 cm <sup>3</sup>	70 cm <sup>3</sup>		
-> Valeur de Bleu		1,5	1,1		
<i>Ecartype</i>		<b>0,229609357</b>			
<i>Moyenne</i>		<b>1,3</b>			

**Annexe 5: Limites d'Atterberg**

N° tare	Limite de liquidité					Limite de plasticité			
	1	2	3	4	5	A	B	C	D
Poids total humide (g)	25,94	25,00	26,31	28,94	24,34	19,45	18,44	18,25	
Poids total sec (g)	23,40	22,49	23,61	25,35	22,20	19,18	18,13	17,96	
Poids tare (g)	18,24	17,28	17,79	17,63	17,55	17,84	16,70	16,56	
Poids de l'eau (g)	2,54	2,51	2,70	3,59	2,14	0,27	0,31	0,29	
Poids sec (g)	5,16	5,21	5,82	7,72	4,65	1,34	1,43	1,40	
Teneur en eau (g)	49,2%	48,2%	46,4%	46,5%	46,0%	20,1%	21,7%	20,7%	
Nombre de coups N	17	23	24	34	35				



$\omega_L =$  **47,5%**  
 $\omega_P =$  **20,8%**

Indice de plasticité :

$I_P = \omega_L - \omega_P$   
 $I_P =$  **26,7%**

**Annexe 6: Poids spécifiques des matériaux (latérite et chaux éteinte)**

N° échantillon (le cas échéant)	Poids sec matériaux mis dans la cuve (g)	Volume d'eau distillé ajouté (cm <sup>3</sup> )	Pression finale ( P' ) cuve échantillon + chambres (mWs)				Valeur lu (cm <sup>3</sup> )	ys (KN/m <sup>3</sup> )
			1er essai	2ième essai	3ième essai	$\bar{P}'$ , moyenne (mWs)		
<i>CHAUX ETEINTE 01</i>	416,8	422,2	7,60	7,60	7,60	7,60	586	2,55
<i>CHAUX ETEINTE 03</i>	512,3	413,9	8,15	7,95	7,95	8,02	623	2,45
<i>Moyenne</i>								2,50
<i>Ecartype p</i>								0,05
<i>LATERITE CC3D 01</i>	588,9	410,3	8,05	7,80	7,80	7,88	612	2,92
<i>LATERITE CC3D 02</i>	593,5	423,3	8,40	8,20	8,00	8,20	638	2,76
<i>Moyenne</i>								2,84
<i>Ecartype p</i>								0,081

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

### Annexe 7: Densité apparente des matériaux (latérite et chaux éteinte)

Client	Titre du projet	Visa ing	Operateur	Date			
2IE/BIG	Stabilisation des BTC à la chaux éteint		Salif KABORE	05/03/2013			
Remarques							
Provenance		Latérite de CC3D			Chaux éteinte de BIG		
Pris d'essai n°:		1	2	3	1	2	3
Volume du recipient en (l)	V	1	1	1	1	1	1
Poids de la tarre (g)	T	322,1	322,1	322,2	322,1	322,1	322,2
Poids de la tarre + matériau sec (g)	P1	1503,7	1502,2	1501,8	899,5	902,8	889,6
Poids du matériau sec (g)	Pm=P1 - T	1181,6	1180,1	1179,6	577,4	580,7	567,4
Masse volumique apparente (Kg/l)	Mv= Pm/V	1,1816	1,1801	1,1796	0,5774	0,5807	0,5674
Ecart type		0,001040833			0,006925557		
Masse volumique moyenne (Kg/l)		1,180			0,575		
		$M_{v_{moy}}$					

**Annexe 8: Densité apparente des BTC stabilisé à la chaux éteinte**

Desnsité apparente							
Composition	N°	M (kg)	Long (cm)	Larg (cm)	Haut(cm)	Vol (m3)	ρ(kg/m3)
10% Chaux éteinte	H1	3,2	13,8	14	9,5	0,0018354	1743,489
	H2	3,247	13,9	14	9,4	0,0018292	1775,054
	H3	3,243	13,55	13,8	9,3	0,0017390	1864,857
	Moyenne						<b>1794,47</b>
	Ecartype						<b>51,4147</b>
15% Chaux éteinte	H1	3,571	13,95	13,95	9,8	0,0019071	1872,472
	H2	3,5	14	14	9,6	0,0018816	1860,119
	H3	3,47	13,90	13,90	9,60	0,0018548	1868,11
	Moyenne						<b>1866,90</b>
	Ecartype						<b>5,11512</b>
20% Chaux éteinte	H1	3,156	13,9	13,9	9,6	0,0018548	1701,516
	H2	3,129	13,8	14	9,7	0,0018740	1669,655
	H3	3,234	13,9	14	9,5	0,0018487	1749,337
	Moyenne						<b>1706,84</b>
	Ecartype						<b>32,747</b>
10% de Ciment	H1	3,674	14	14	9,5	0,0018620	1973,147
	H2	3,662	14	14	9,5	0,0018620	1966,702
	H3	3,61	14,00	14,00	9,50	0,0018620	1936,627
	Moyenne						<b>1958,83</b>
	Ecartype						<b>15,9156</b>

**Annexe 9: Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau**

Pourcentage d'absorption d'eau (%)					
Composition	N*	M0	M4(24h)	ΔM	Ab(%)
10% Chaux éteinte	1	3,52	3,86	0,34	10,80
	2	3,44	3,74	0,30	8,72
	3	3,55	3,88	0,33	9,30
	Moyenne	3,50	3,83	32%	9,23
	Ecartype	0,06	0,09	0,04	1,07
15% Chaux éteinte	1	3,56	3,86	0,30	8,43
	2	3,33	3,69	0,36	10,81
	3	3,44	3,74	0,30	8,72
	Moyenne	3,44	3,763333	32%	9,29
	Ecartype	0,12	0,09	0,03	1,30
20% Chaux éteinte	1	3,56	3,90	0,34	9,55
	2	3,50	3,86	0,36	10,29
	3	3,60	3,92	0,32	8,89
	Moyenne	3,55	3,893333	34%	9,57
	Ecartype	0,05	0,03	0,02	0,70
10% ciment	1	3,63	3,95	0,32	8,82
	2	3,61	4,09	0,48	13,30
	3	3,67	4,04	0,37	10,08
	Moyenne	3,62	4,026667	39%	10,73
	Ecartype	0,01	0,07	0,08	2,31

Absorption Capillaire						
Désignation	N°	M(t=0) (Kg)	M(t=10) (Kg)	M - M0	S√t	Cb (%)
10% de Chaux Eteinte	C1	3431,270	3474,970	43,700	619,81	7,05
	C2	3217,950	3272,740	54,790	619,81	8,84
	C3	3177,170	3213,900	36,730	619,81	5,93
	Moyenne					7,27
	Ecartype					1,20
15% de Chaux Eteinte	C1	3398,150	3436,260	38,110	619,81	6,15
	C2	3450,280	3485,060	34,780	619,81	5,61
	Moyenne					5,88
	Ecartype					0,27
20% de Chaux Eteinte	C1	3146,200	3183,930	37,730	619,81	6,09
	C2	3269,860	3304,410	34,550	619,81	5,57
	C3	3326,020	3355,260	29,240	619,81	4,72
	Moyenne					5,46
	Ecartype					0,57
10% Ciment	C1	3860,000	3870,000	10,000	619,81	1,61
	C2	3770,000	3780,000	10,000	619,81	1,61
	C3	3810,000	3820,000	10,000	619,81	1,61
	Moyenne					1,613
	Ecartype					0,000

**Annexe 10: Essais de résistance à la compression sèche et humide à 45 et 70 jours**

Compression simple sèche à 45 jours					
Désignation	Force Maximale (kN)	Ecartype sur la force	surface (cm <sup>2</sup> )	Resist à la compression (MPa)	Ecartype
10 % Chaux éteinte	81,67	2,36	196	4,17	0,12
15 % Chaux éteinte	98,33	2,36	196	5,02	0,12
20 % Chaux éteinte	83,33	2,36	196	4,25	0,12
10 % Ciment	212,50	2,5	196	10,84	0,13
Compression simple humide à 45 jours					
10 % Chaux éteinte	50,67	0,94	196	2,59	0,05
15 % Chaux éteinte	59,33	0,94	196	3,03	0,05
20 % Chaux éteinte	49,00	1,41	196	2,50	0,07
10 % Ciment	175	1,23	196	8,93	0,06

Compression simple sèche à 70 jours de cure					
Désignation	Force Maximale (kN)	surface (cm <sup>2</sup> )	Resist à la compression (MPa)	Moyenne	Ecartype
10 % Chaux éteinte	100,00	196,0	5,10	5,03	0,08
	97,00	196,0	4,95		
15 % Chaux éteinte	160,00	196,0	8,16	7,91	0,26
	150,00	196,0	7,65		
20 % Chaux éteinte	135,00	196,0	6,89	6,76	0,13
	130,00	196,0	6,63		
10 % Ciment	212,50	196,0	10,84	10,84	0,00
Compression simple humide à 70 jours de cure					
Désignation	Force Maximale (kN)	surface (cm <sup>2</sup> )	Resist à la compression (MPa)	Moyenne	Ecartype
10 % Chaux éteinte	55,00	196,0	2,81	2,93	0,13
	60,00	196,0	3,06		
15 % Chaux éteinte	80,00	196,0	4,08	3,95	0,13
	75,00	196,0	3,83		
20 % Chaux éteinte	60,00	196,0	3,06	3,19	0,13
	65,00	196,0	3,32		
10 % Ciment	175,00	196,0	8,93	8,93	0,00

**Annexe 11: Essai de flexion trois points**

Flexion trois points
----------------------

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

Dosage	N°	Larg (mm)	Haut (mm)	L0 (mm)	Forces (KN)	Flexion (Mpa)
10% de Chaux Eteinte	A	140	95	195	3,99	0,92
	B	140	95	195	3,98	0,92
	C	140	95	195	3,78	0,88
	Ecartype				0,10	0,02
	Moyenne				3,92	0,91
15% de Chaux Eteinte	A	140	95	195	5,56	1,29
	B	140	95	195	5,47	1,27
	C	140	95	195	5,42	1,25
	Moyenne				5,48	1,27
	Ecartype				0,058	0,01
20% de Chaux Eteinte	A	140	95	195	4,3	1,00
	B	140	95	195	4,44	1,03
	C	140	95	195	4,26	0,99
	Moyenne				4,33	1,00
	Ecartype				0,08	0,02
10% de Ciment	A	140	95	195	6,12	1,42
	B	140	95	195	6,66	1,54
	C	140	95	195	6,26	1,45
	Moyenne				6,35	1,47
	Ecartype				0,23	0,05

### Annexe 12: Essais de Module de Young

Désignation	N°	Temps (µs)	Temps (ms)	L(mm)	V(km/s)	Masse (kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	PR (n)	ED (MN/m <sup>2</sup> )
10% de	1	75	0,0750	140,00	1866,67	34,85	19756,24	0,15	1,676E+10

**Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte**

Chaux éteinte	2	73,6	0,0736	140,00	1902,17	34,37	19484,13	0,15	1,717E+10
	3	77,7	0,0777	140,00	1801,80	35,48	20113,38	0,15	1,59E+10
	Moyenne	75,43	0,0754	140,00	1856,88	34,90	19784,58	0,15	1,661E+10
	Ecartype	2,08	0,0021	0,00	41,56	0,56	315,58	0,15	132724,07
15% de Chaux éteinte	1	67,20	0,0672	140,00	2083,33	35,75	20266,44	0,15	2,142E+10
	2	68,70	0,0687	140,00	2037,85	35,80	20294,78	0,15	2,052E+10
	3	68,00	0,0680	140,00	2058,82	36,10	20464,85	0,15	2,113E+10
	Moyenne	67,97	0,0680	140,00	2060,00	35,88	20342,03	0,15	2,102E+10
	Ecartype	0,75	0,0008	140,00	18,59	0,19	107,31	0,15	9030,3313
20% de Chaux éteinte	1	72,50	0,0725	140,00	1931,03	34,72	19682,54	0,15	1,787E+10
	2	71,20	0,0712	140,00	1966,29	35,41	20073,70	0,15	1,89E+10
	3	73,00	0,0730	140,00	1917,81	35,00	19841,27	0,15	1,777E+10
	Moyenne	72,23	0,0722	140,00	1938,38	35,04	19865,84	0,15	1,818E+10
	Ecartype	0,93	0,0009	140,00	20,46	0,35	196,73	0,15	20062,187
10% de Ciment	1	55,00	0,0550	140,00	2545,45	34,14	19353,74	0,15	3,054E+10
	2	57,00	0,0570	140,00	2456,14	33,43	18951,25	0,15	2,784E+10
	3	59,00	0,0590	140,00	2372,88	33,82	19172,34	0,15	2,629E+10
	Moyenne	57,00	0,0570	140,00	2458,16	33,80	19159,11	0,15	2,819E+10
	Ecartype	2	0,0020	140,00	70,47	0,36	201,57	0,15	243757,07

**Annexe 13: Essais de propriétés thermiques**

Propriétés thermiques					
Composition	N°	K(w/m.K)	C(MJ/m <sup>3</sup> .K)	D(mm <sup>2</sup> /s)	Temperature
<b>10% de</b>	A	0,94		1,28	31,56

## Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte

<b>Chaux Eteinte</b>	B	1,03	3,22	0,32	31,60
	C	1,19	2,10	0,57	31,66
	Moyenne	1,05	2,66	0,72	31,61
	Ecartype	0,13	0,79	0,50	0,05
<b>15% de Chaux éteinte</b>	A	1,06	2,90	0,37	31,78
	B	1,14	2,48	0,46	31,69
	C	0,84	2,11	0,40	31,83
	Moyenne	1,01	2,50	0,41	31,77
	Ecartype	0,16	0,39	0,05	0,07
<b>20% de Chaux éteinte</b>	A	1,14	3,56	0,90	32,19
	B	1,08	1,45	0,91	32,07
	C	1,10	2,01	1,28	32,41
	Moyenne	1,11	2,34	1,03	32,22
	Ecartype	0,03	1,09	0,22	0,17
<b>10% de Ciment</b>	A	1,09	3,45	0,32	
	B	1,09	2,00	0,54	
	C	1,19	4,17	0,29	
	Moyenne	1,12	3,21	0,38	
	Ecartype	0,06	1,11	0,14	

**Annexe 14: Dossier plan de Bâtiment témoin**