



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

VERIFICATION DES CARACTERISTIQUES DES BTC STABILISES AVEC LA CHAUX

***MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT***

OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le 09 juin 2011 par :

BOKOR YOUSOUF SAKINE

Travaux dirigés par:

- Raffaele VINAI, Enseignant Chercheur
- Ismaïl GUEYE, Enseignant-Chercheur

UTER-ISM : Infrastructures et Sciences des
Matériaux

Jury d'évaluation du stage :

Président : Ismaila Gueye

Membres et correcteurs : -Raffaele Vinai

-J.H.Thomassin

-Zi Mamadou

Promotion 2010-2011

DEDICACES

Je dédie ce travail :

- ❖ A mon défunt père **YOUSOUF SAKINE**, celui grâce a qui j'ai vu le jour et qui a bien pris soin de moi. A tes cotés, Père, j'ai goûté aux merveilles de la vie. Tu ne récoltes pas le fruit de ta semence, mais comme tu l'auras voulu, je saurai en faire bon usage au profit de tous.

- ❖ **A ma mère** source de paix, de bonheur et d'amour ; celle-là même qui m'a toujours prodigué de bon conseil pour un monde de combat et de tolérance.

- ❖ **A mes parents, frères et sœurs**, pour leurs soutiens multiformes

REMERCIEMENTS

Ce travail est pour moi une grâce de Dieu. J'ai bénéficié de l'encouragement et du soutien constant de nombreuses personnes. Je trouve ici l'occasion de leur exprimer mes sincères gratitude. Conscient du fait que de simples mots de remerciements à travers des lignes ne sauraient être à mesure de traduire la grandeur des services que vous m'avez rendu, je vous prie de bien vouloir considérer leur symbolique.

Qu'il me soit permis de remercier particulièrement :

- ✓ Mes encadreurs enseignants chercheurs Raffaele VINAI et Ismaïla GUEYE pour leur entière disponibilité, leurs conseils et leurs éclaircissements qui m'ont tant servi ;
- ✓ Monsieur ZI MAMADOU, qui nous a soutenus et suivi tout au long de ce stage
- ✓ L'ensemble du corps enseignant du 2iE pour les connaissances qu'ils nous ont transmises au cours de la formation du cycle de master.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont œuvré pour l'aboutissement de ce travail et de ma formation, et dont les noms n'ont pas été mentionnés ici, qu'ils veuillent bien accepter l'expression de ma profonde reconnaissance.

RESUME

Plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre (CRATerre, 1991) Cela présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. La présente recherche coordonnée par le Laboratoire d'Eco-Matériaux de Construction (LEMC) porte sur l'étude et la vérification des caractéristiques des BTC stabilisés avec la chaux.

Les différents essais de caractérisation physique (Proctor, limites d'Atterberg, tamisage et poids spécifique) ont été réalisés au laboratoire de 2iE de Kamboinsé tandis que la fabrication des briques et les essais de compression ont été faits au laboratoire de Ouagadougou au 2iE. Le but de cette étude porte sur la comparaison de la résistance mécanique des briques non stabilisées et celles stabilisées à la chaux. L'objectif est de démontrer que l'ajout de stabilisant peut apporter une amélioration notable dans la résistance de briques en terre.

La caractérisation et l'influence de la teneur en stabilisant ont été étudiées avec plusieurs dosages à la chaux dont un essai à 5%, un autre à 10% et un dernier à 15%. Les périodes d'essai de compression sont fixées à 7, 14 et 28 jours. Pendant ce temps les briques ont été enveloppées d'un film plastique afin de conserver leur teneur en eau. Les mesures de la résistance à la compression ont été faites par la méthode d'écrasement des briques. La résistance à la compression dépend de la granulométrie et de la teneur en argile de la terre.

Les résultats obtenus suite aux écrasements à 7 jours et à 28 jours des briques non stabilisées sont respectivement de 0,74 MPa et 0,90 MPa. On constate que cette valeur croit en fonction du temps de cure. A 28 jours, la stabilisation à 15% donne une résistance à la compression de 1,56 MPa tandis que la stabilisation à 5% donne une valeur de 1,33 MPa. De même les valeurs de la résistance à la flexion à 28 jours sont les suivantes: 2,47 MPa pour les briques dosées à 15% et 0,38 MPa pour les briques dosées à 5%.

En résumé, la résistance à la compression et à la flexion des BTC augmente en fonction du dosage en stabilisant et du temps mis avant l'écrasement.

A la fin de cette étude, nous avons émis quelques points de vue et perspectives en vue de l'utilisation des BTC stabilisées à la chaux.

Mots clés : Matériaux locaux, BTC (brique de terre comprimée), BTS (Briques de Terre stabilisée à la chaux), Résistance à la compression, Construction

ABSTRACT

More than one- third of the earth population lives today in houses made with earth (CRATerre, 1991). This brings lots of environmental, social and cultural convenient. This actual research paper, done in relation with Eco-Material Constructions Laboratory (LEMC), is about characteristic of lime stabilized BTC study and verification.

The different tests of physical characteristics (Proctor, Atterberg limits, sieving and specific weight) had been realized in 2iE laboratory of Kamboinsé while the fabrication of the bricks at compression tests was done in 2iE laboratory of Ouagadougou. The goal of this study is on the comparison of the mechanical resistance of non-stabilized bricks and those stabilized with lime. Its purpose is to demonstrate that the addition of stabilizing product can bring noticeable improvement to the resistance of the bricks made with earth.

The impact characterization of the stabilization product content had been studied with multiple lime content, with one test of 5%, another of 1.5% and the last of 15%. The compression test time frames are fixed to 7, 14 and 28 days. During that time, the bricks had been covered up with a plastic sheet in order to keep their water content. The resistance to compression measurements had been done by the method of crushing the bricks. The compression resistance depends on the granule size and the silt content of the earth.

The obtained results after crushing at 7 day and 28 day of the non-stabilized bricks are respectively 0.74MPa and 0.900MPa. It was noticed that this value increases in relation with cure time. At 28 days, the stabilization at 15% gives a value of 1.56MPa, while the stabilization at 5% gives a value of 1.33MPa. Like these, the resistance to bending at 28 days is the followings: at 15% is 2.47MPa and 0,38Mpa at 5%, .

To summarize, the BTC resistance to compression and to bending increase with the stabilizer content and the time set before crushing.

At the end of this study, we gave some points of view and prospective views on the use of lime stabilized BTC.

Keywords: local materials, BTC (compressed earth bricks), BTS (lime stabilized earth bricks), Resistance to compression, construction.

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

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

BTC : Bloc de Terre Comprimée

BTS : Bloc de Terre Stabilisée

Id : Indice de plasticité

LEMC : Le Laboratoire d'Eco-Matériaux de Construction

PMI: Petites et moyennes Industries

PME : Petites et Moyennes Entreprises

Wl : Limite de Liquidité

Wp : Limite de Plasticité

Wopm : Teneur en eau Optimale (proctor modifié)

γ_d : Densité sèche maximale

Sommaire

RESUME	IV
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	VI
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 PRESENTATION DU PROJET.....	3
1. Présentation du projet	3
1.1. Contexte et justification	3
1.2. Objectifs	3
2. Approche méthodologique.....	4
3. PROGRAMME de travail	5
Chapitre 2 GENERALITES SUR LES BLOCS DE TERRE COMPRIMEE	6
1. Introduction.....	6
2. Définition.....	6
3. Processus de production des BTC	7
3.1 Présentations techniques pour le choix des matériaux	7
3.2 Le décapage.....	8
3.3 Extraction	8
3.4 Le tamisage	8
3.5 Le malaxage	9
3.6 La production	9
3.7 Le séchage.....	9
4. Utilisation de l'argile dans le processus de fabrication des BTC	11
3.1. Définition de l'argile.....	11
3.2. Caractéristiques d'argiles	11
5. Utilisation de la chaux dans le processus de fabrication des BTC	11
5.1. Définition de la chaux	11
5.2. L'effet de la chaux	12
5.3. Le cycle de la chaux	14
5.4. Dosage de la chaux	14
6. Principes de la stabilisation.....	14
6.1. Moyen de stabilisation	15

6.2. Exemple de résultats obtenus sur la stabilisation par différents auteurs	15
Chapitre 3 : IMPACTS DES BTC SUR LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	17
1. Sur le plan sanitaire	17
2. Sur le plan écologique	17
3. Aspect psychologique.....	17
4. Confort et esthétique	18
5. Sur le plan développement durable	18
Chapitre 4 MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES	19
1. Caractéristique physique des matériaux	19
1.1 Essais d'identification.....	19
1.2 Essais de laboratoire	19
2. Caractérisation mécanique des briques.....	21
2.1 Les matériels disponibles pour la production et test de BTC.....	21
2.2 Méthodes expérimentales	22
3. Production des BTC au laboratoire du site de Ouagadougou	23
4. Condition de cure	24
5. Essais de compression	25
6. Mode opératoire pour les essais de résistance à la compression.....	25
7. Présentation des résultats des écrasements	26
8. Conclusion sur les valeurs des résistances à la compression	28
9. Récapitulatif des moyennes des valeurs du Module de Young en MPa.....	29
10. Teneurs en eau de l'échantillon.....	30
11. Résistance à la flexion à 32jours	31
CONCLUSION	33

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: composition du matériau</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 2: Résultats des essais de compression de l'argile dosé à la chaux (Laurent GUÉRIN, 1985)</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 3: Résultats obtenus par J.E.OTI, J.M KINUTHI, 2009</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 4: Caractéristiques géotechniques du matériau</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 5 :Quantité des mélanges réalisés</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 6 des essais d'écrasement à 7jours.....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 7 : Essais d'écrasement à 14jours.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 8 : Essais d'écrasement à 28jours.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 9: Valeurs moyenne de module de Young E_1 et E_s.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 10: Valeurs moyenne de teneur en eau de l'échantillon.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 11: Récapitulatif de résistance à la flexion.....</i>	<i>32</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : programme de travail</i>	5
<i>Figure 2: Cycle de production BTC (V.HOUBEN et AL, 1995)</i>	10
<i>Figure 3: courbe granulométrique non corrigée</i>	20
<i>Figure 4: Intervalle de confiance de la courbe granulométrique.</i>	21
<i>Figure 5: Malaxeur à axe vertical</i>	21
<i>Figure 6: la Presse manuelle TERSTARAM</i>	22
<i>Figure 7: Stockage des briques</i>	24
<i>Figure 8: Presse électrique</i>	25

INTRODUCTION GENERALE

La terre est un des premiers matériaux utilisés par l'Homme dans le domaine de la construction. Ce n'est que depuis l'apparition du ciment que les techniques de construction en terre ont été délaissées dans les zones urbaines et dans les pays industrialisés. L'utilisation de la terre dans le secteur de la construction, dans une optique de développement durable, implique l'analyse de la situation qui motive ce choix ; en prenant en considération les aspects écologiques, environnementaux et économiques, la viabilité culturelle et temporelle des impacts positifs et négatifs qui résultent de ce choix.

De ce fait, le matériau terre connaît actuellement un regain d'intérêt suite à la crise du logement. Contrairement au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels.

La terre est par excellence le matériau utilisé dans les constructions en pays tropicaux et particulièrement au Burkina Faso. L'inconvénient est que ce matériau ne résiste pas toujours aux intempéries et beaucoup de bâtisses en terre crue et particulièrement celles construites avec des matériaux sans aucun traitement sont emportées par les pluies.

Dans le souci de remédier à ces contraintes tout en valorisant les matériaux locaux et protégeant l'environnement, nous nous sommes lancés dans cette recherche qui s'intitule « **vérification des caractéristiques des BTC stabilisés avec la chaux** ». Il est présenté dans ce mémoire les résultats et analyses relatives aux possibilités d'utilisation des matériaux stabilisés avec la chaux dans la construction. De plus il sera analysé la mise en œuvre de ces matériaux tout en spécifiant les techniques et les mesures qu'il faut prendre en compte pour une bonne exécution.

La présente recherche a pour objectif principal la valorisation des matériaux locaux et leur caractérisation en vue de vulgariser à vaste échelle leur utilisation. Les objectifs spécifiques sont :

- Caractérisation de BTC stabilisé et non stabilisé,
- formulation et production de BTC
- vérification technique de BTC en utilisant un sol argileux stabilisé avec la chaux.

Pour ce faire, la démarche adoptée pour atteindre ces objectifs est la suivante :

Présentation du projet et Approche méthodologique

- généralités sur les BTC
- matériels et méthodes expérimentales
- analyse et exploitation des résultats
- impact des BTC sur les aspects environnementaux
- conclusion et recommandations

Chapitre 1 PRESENTATION DU PROJET

1. Présentation du projet

1.1. Contexte et justification

Le Laboratoire d'Eco-Matériaux de Construction (LEMC) du 2iE a comme mission de contribuer au développement durable en matière de constructions civiles à travers la conception, la caractérisation et le développement des éco-matériaux, et à la création et au développement de PME/PMI dans les domaines des technologies de construction innovantes et respectueuses de l'environnement, en valorisant aussi les matériaux, les produits et sous-produits locaux. L'un des axes de recherche est l'amélioration de la technologie des Blocs en Terre Comprimé (BTC) à travers la stabilisation avec des matériaux locaux. Par ailleurs l'utilisation de la terre comme moyen de construction demande beaucoup de savoir-faire de la part du constructeur. Il est donc important de prendre les devants en améliorant et en valorisant les matériaux locaux à l'instar des BTC. Contrairement à ce qu'on pense généralement, bâtir en terre n'est pas si simple. Le seul fait que les autochtones de nombreux pays bâtissent leurs maisons avec de la terre depuis des milliers d'années, ne signifie pas que la technologie peut être développée et maîtrisée par tout un chacun. En réalité, le manque de compétence conduit à la réalisation de constructions de piètre qualité, qui donnent au matériau terre une mauvaise réputation.

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.

La stabilisation à la chaux des blocs en terre comprimée peut être une solution intéressante et pour la disponibilité potentiel du dit agent stabilisant dans le pays, et pour les caractéristiques environnementales du durcissement dudit matériau, et pour l'élargissement de la gamme de matériaux adaptés vers les sols argileux.

1.2. Objectifs

L'objectif général de ce projet est la valorisation des matériaux locaux et leur caractérisation en vue de vulgariser à vaste échelle leur utilisation. Afin de satisfaire les conditions d'étude et de prédire les caractéristiques des matériaux étudiés et aussi de pouvoir aboutir aux différents

résultats attendus au cours des différents essais, nous avons énumérer les objectifs spécifiques suivants :

- Caractérisation du sol étudié sans stabilisation
- formulation et vérification technique de BTC en utilisant un sol argileux stabilisé avec la chaux.

2. Approche méthodologique

La compréhension du sujet et l'analyse des termes de références sont des points clefs dans la conduite de cette étude. Une recherche documentaire très poussée a été effectuée au centre de documentation et de l'information du 2iE afin d'approfondir les connaissances du sujet. Elle nous a permis de collecter les références bibliographiques disponibles et de faire un recueil des données et informations existantes.

Des personnes nous ont servi de référence pour mener à bien ce travail. Il s'agit notamment de ZI Mamadou et Bruno Ousmane. Des recherches 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 qui traitent sur les problématiques du même sujet.

Un programme de travail sera établi afin de nous permettre de suivre étape par étape l'évolution de nos travaux de recherche.

3. PROGRAMME de travail

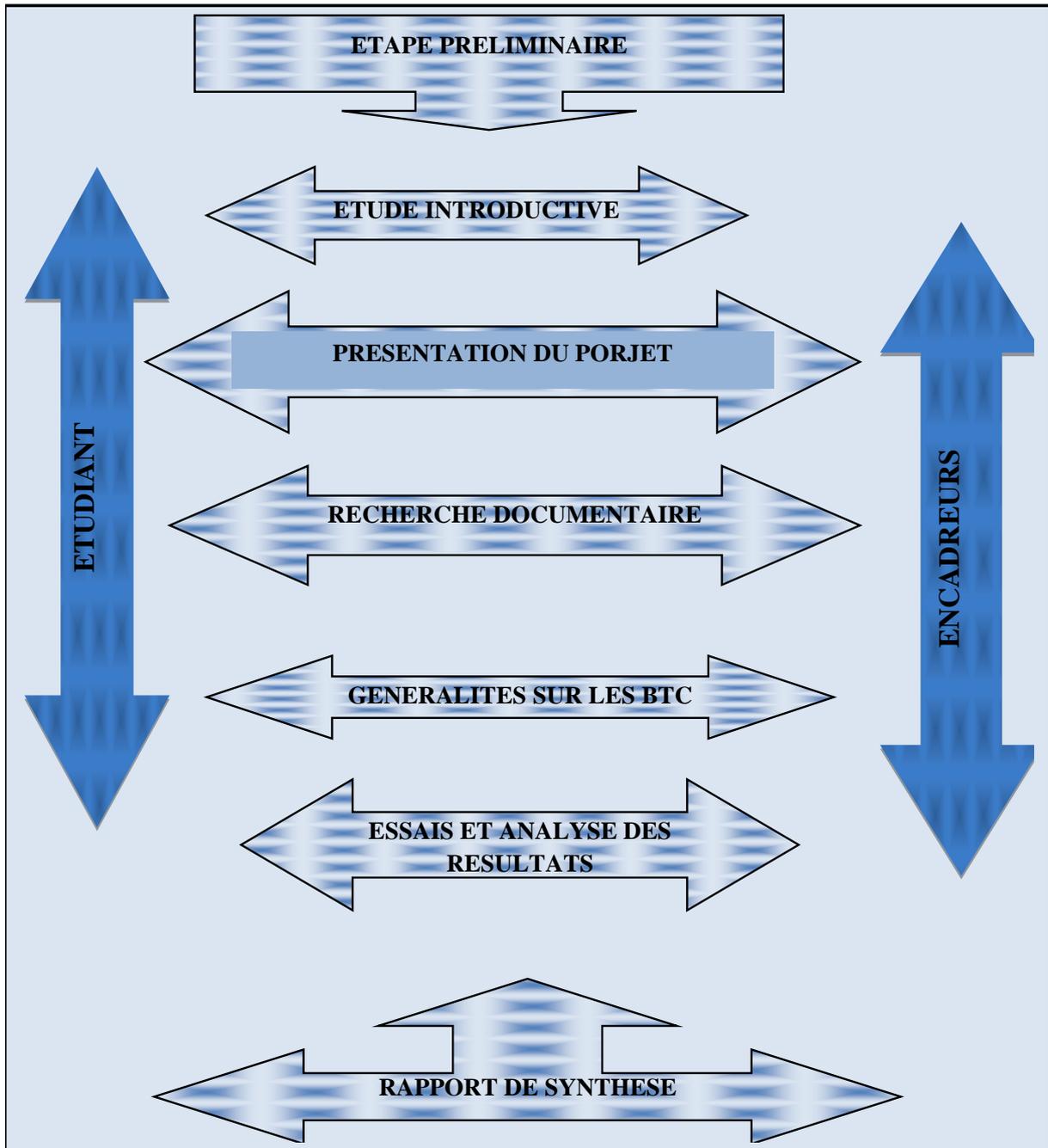


Figure 1 : programme de travail

Chapitre 2 GENERALITES SUR LES BLOCS DE TERRE COMPRIMEE

1. Introduction

Les Blocs de Terre Comprimée (ou BTC) permettent une utilisation moderne de la terre crue. Ils sont utilisés pour créer les cloisons de distribution ou doubler les murs extérieurs, dans le but de donner de l'inertie thermique à l'habitat. Différentes des adobes, des briques de terre moulée, les BTC sont très fortement comprimées à l'aide d'une presse. Faites à partir d'une terre légèrement humide, les BTC, une fois pressées, sont stockées en cure humide (sous bâche) pendant 3 semaines à la suite desquelles elles pourront être mises en œuvre. Techniquement, la terre est tamisée pour être rendue homogène et surtout enlever les cailloux de diamètre > 6mm. En fonction de sa nature, elle peut ensuite être amendée de sable ou d'argile, avec ajout de stabilisant éventuellement. Légèrement humidifiée, elle va être ensuite mise en brique. Un bac doseur permet de préparer la quantité de terre nécessaire à une brique.

La terre est déversée dans le moule et le levier de la presse rabattu de la verticale à l'horizontale. Trois personnes ayant un rythme régulier et continu produisent environ 300 à 700 BTC à la journée.

2. Définition

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de piliers de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Elle a été développée aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie (Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, CRATerre- EAG, Blocs de terre comprimée, Manuel de conception et de production. Volume II, 1995).

Le BTC est très régulier en forme et en dimension, ils sont pleins ou perforés ce qui permet de réaliser des travaux de maçonnerie très variés. Les blocs de terre comprimés, sont fabriqués à partir de terre humide et compactée dans une presse.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre comprimée stabilisée ». Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terre-

eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières.

3. Processus de production des BTC

Les étapes essentielles de la production du BTC sont les suivantes:

- ✓ Le choix de la terre ;
- ✓ Le tamisage ;
- ✓ Le malaxage ;
- ✓ La production ;
- ✓ Le séchage

3.1 Présentations techniques pour le choix des matériaux

Le choix de la terre est nécessaire dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie de transformation de la terre en matériau de construction pour la fabrication des BTC. Toutes les terres ne conviennent pas pour la fabrication des blocs. Les quelques règles simples qui suivent ont pour but d'écartier rapidement les terres de trop mauvaise qualité. On estime que la meilleure terre doit se composer de :

Tableau 1: composition du matériau

Sable	55 à 75%
Limon	10 à 28%
Argile	15 à 28%

Pour le choix des terres, les caractéristiques suivantes sont aussi à considérer

- ✓ **IP** : idéalement proche de 9, compris entre 7 et 25,
- ✓ **WL** : idéalement proche de 27, compris entre 25 et 45,
- ✓ **WP** : idéalement proche de 17, compris entre 10 et 25.

(Laurent GUERIN, Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics ,1985).

Ainsi le choix de la carrière BTC passe par plusieurs tests d'identification. Les principaux tests réalisés sur le terrain sont entre autres le test d'identification sensoriel qui regroupe :

- ✓ La vue a pour objectif d'identifier la granulométrie du sol ;
- ✓ L'odorat permet quant à lui d'identifier les matériaux par leur odeur. Ce test est très important pour le choix du sol pour le BTC ;
- ✓ Le toucher a pour objectif de confirmer s'il s'agit du sol argileux ou limoneux de la manière suivante :
 - sable : les sols sablonneux se rincent sans problème;
 - limon : les sols limoneux sont plus difficiles à rincer, et paraissent pulvérulents;
 - argile : les sols argileux donnent une sensation onctueuse, ils sont difficiles à rincer.

3.2 Le décapage

La couche supérieure organique de la terre n'est pas intéressante pour le BTC. Ainsi on procède au décapage de cette couche avant l'exploitation de la carrière.

3.3 Extraction

La terre provient de la désagrégation de la roche mère qui à travers le temps a subi des transformations occasionnées par :

- ✓ Des érosions mécaniques ;
- ✓ Des conditions climatiques extrêmes ;
- ✓ Des transformations chimiques ;
- ✓ Des migrations verticales des composantes vers le bas sous l'effet de la pluie et vers le haut par l'effet de l'évaporation.

Ces différentes transformations qu'a subi la terre modifient l'homogénéité de la couche, d'où la superposition des couches de nature plus ou moins différente. Le transport du matériau terre de la carrière jusqu'au lieu de production se fait par camion Benne.

3.4 Le tamisage

Le criblage est indispensable quand il y a défaut de texture. Sur le site visité de Loumbila, le criblage est un passage obligé. Le système de criblage rencontré sur le terrain est manuel. 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 6 à 10mm qui retire les éléments grossiers et indésirables. Le chargement se fait manuellement à l'aide des pelles par des manœuvres.

3.5 Le malaxage

Après avoir criblé le matériau, on passe au malaxage. Il est particulièrement important pour la qualité du BTC. Un mélange homogène est indispensable, avec ou sans stabilisant. Ensuite, après le malaxage à sec, on humidifie la terre de façon uniforme en ajoutant l'eau par fines gouttelettes à l'aide d'un arrosoir manuel, dans notre cas ici nous avons pris 20 litres d'eau pour 100 litres de terres. Dans le cas où la terre est très humide, on étale le matériau afin de le sécher et obtenir la teneur en eau optimale.

3.6 La production

Nous avons constaté que la production de BTC se fait à l'aide des presses manuelles adaptées aux différents types de blocs réalisés. Pour le site visité, ce sont des Presses conçues pour produire des différentes formes de briques. Chaque presse nécessite deux ouvriers qualifiés plus un ouvrier qui amène le matériau.

3.7 Le séchage

Le séchage se fait généralement à l'ombre. Le séchage trop rapide peut endommager les blocs car ils vont perdre leur teneur en eau optimale.

Le cycle de production est résumé par un organigramme (figure2) nous permettant de comprendre le processus d'obtention des BTC.

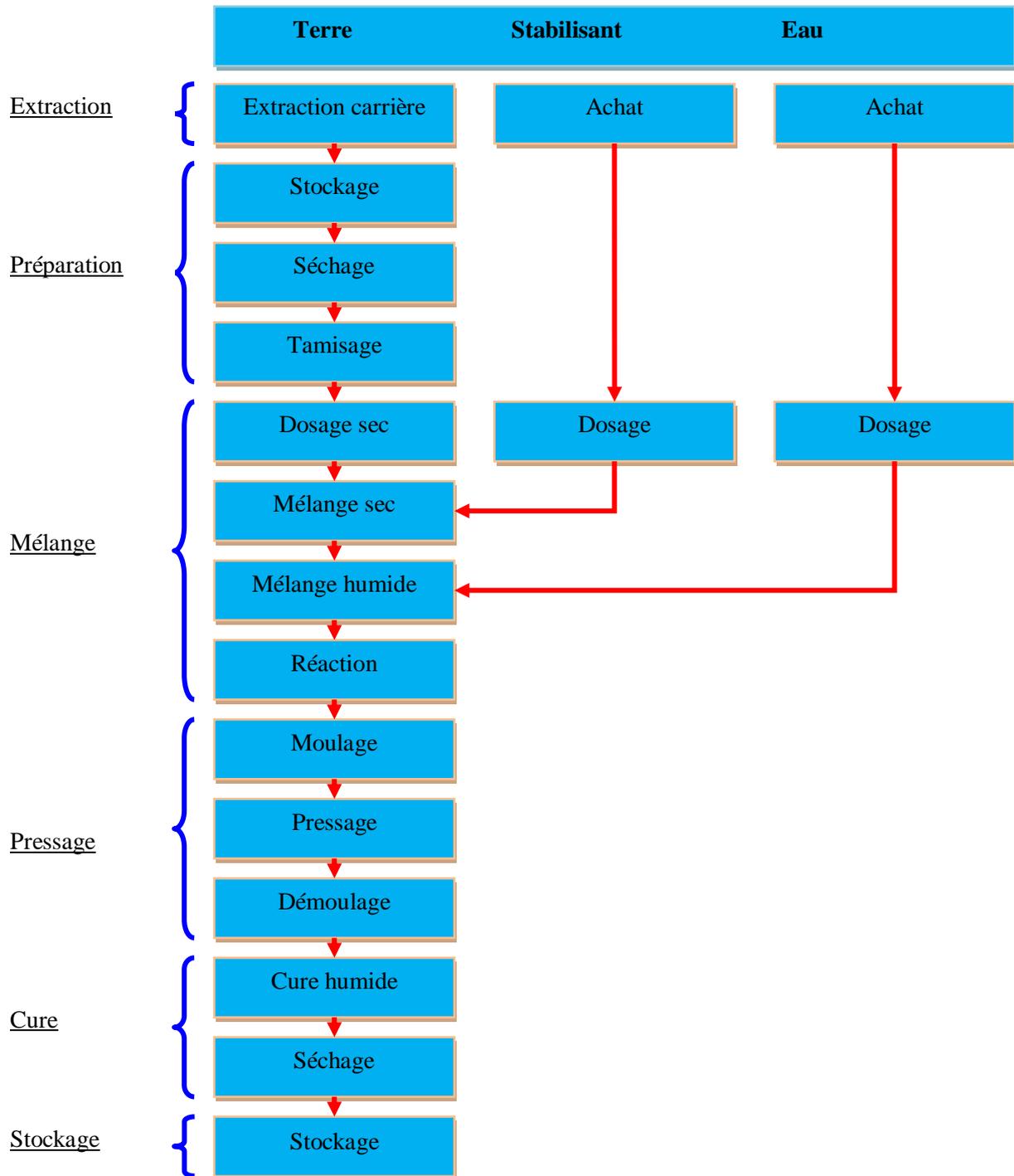


Figure 2: Cycle de production BTC (V.HOUBEN et AL, 1995)

4. Utilisation de l'argile dans le processus de fabrication des BTC

3.1. Définition de l'argile

L'argile est une roche composée principalement de silicate d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (construit par un empilement de couches tétraédriques) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

3.2. Caractéristiques d'argiles

En général les grains individuels des minéraux argileux sont de taille microscopique et semblable à des plaquettes. Cette structure en feuillets dont la surface est bien plus importante que l'épaisseur, leur permet d'absorber de grandes quantités d'eau par adhésion, ce qui leur donne leur plasticité et fait gonfler certaines variétés. Le degré de plasticité des argiles varie : mélangées à l'eau, elles se prêtent plus ou moins bien au moulage ou au façonnage.

Pour avoir une meilleur résistance le matériau argileux est stabilisé avec de la chaux comme dans le cas de notre projet.

5. Utilisation de la chaux dans le processus de fabrication des BTC

5.1. Définition de la chaux

La chaux est le résultat de la cuisson d'un calcaire à une température entre 800° et 1000°C. Ce calcaire qui va être calciné trouve son origine dans les sédiments et dépôts des organismes marins laissés en place, après le retrait des mers dans certaines régions, il y a plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce calcaire contient principalement du carbonate de calcium (CaCO_3), mais aussi de la silice, de l'oxyde de fer, de l'aluminium ou d'autres minéraux dans des proportions plus faibles. Il y a trois grandes familles de chaux (chaux aériennes, chaux naturelles et chaux hydrauliques) qui se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

- ✓ Les chaux aériennes : fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue, limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.

- ✓ La chaux vive (CaO) : C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avide d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150°C (réaction très exothermique).
- ✓ La chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la Chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

- ✓ Les chaux naturelles : fabriquées à base de calcaire siliceux, elles débutent leur prise au contact de l'eau et finissent de durcir au contact de l'air. Plus réactive, leur résistance augmente dans le temps.
- ✓ Les chaux hydrauliques sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent.

5.2. L'effet de la chaux

La chaux n'a que peu d'effet sur les terres très riches en matières organiques (quantité supérieure à 20 %) et sur les terres manquant d'argile. Elle est en effet plus efficace et peut l'être davantage que le ciment (Laurent GUERIN, Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics ,1985).

ec des terres argilo-sableuses et surtout avec des terres très argileuses. Les effets de la chaux sont donc 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 vite avec des argiles du type montmorillonites qu'avec des argiles kaoliniques, réduisant la plasticité des montmorillonites et n'ayant que peu d'effet sur la plasticité des kaolinites. L'effet de la teneur en eau des terres argileuses, stabilisées à la chaux, est important, notamment aux stades de la pulvérisation et du compactage. Les pouzzolanes naturelles réagissent particulièrement bien avec la chaux. Notons par ailleurs que les dosages en chaux sont toujours donnés pour des chaux de qualité industrielle contenant 90 à 99 % de "chaux active". Pour les chaux artisanales, qui peuvent ne contenir que 60% de chaux active (le reste

étant constitué d'incuits ou de surcuits), il faudra augmenter ces dosages. On retiendra deux modes principaux d'emploi de la chaux pour améliorer les performances d'une terre:

- ✓ Modification de la terre : la chaux est ajoutée par pourcentage indiqué dans les termes de référence. Cette opération réduit la plasticité de la terre et active sa floculation.
- ✓ Stabilisation de la terre : les dosages sont très supérieurs. Les abaques de référence sur la convenance des terres et le dosage en chaux doivent être interprétés avec beaucoup de réserve. Les essais d'érosion, d'humidification et de séchage ne sont réalisés qu'après un temps de cure des matériaux de trois mois pour avoir des résultats satisfaisants.

Ces deux modes d'emploi de la chaux peuvent avoir les effets suivants :

- ✓ Augmentation de la résistance à la compression : la résistance à la compression augmente en fonction de la teneur en argile, du pourcentage de chaux ajouté à la terre et du temps de cure. Les meilleurs résultats sont obtenus avec de l'argile à kaolinite (Laurent GUERIN, Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics ,1985)

Le tableau 2 suivant montre un exemple de cette augmentation de résistance

Tableau 2: Résultats des essais de compression de l'argile dosé à la chaux (Laurent GUÉRIN, 1985)

Echantillons	De chaux éteinte en %	Résistance à la compression simple en MPa			
		2j.	14j	28j	90j
Argile I	0	2,4			
	3	7,2	2,4	9,6	9,3
	5	11,5	16,7	18	26,9
Argile II	7	13,2	19,7	21,1	32,5
	0	2,0			
	3	4,3	5,4	6,4	7,6
	5	6	7,2	7,3	10,9
	7	5,7	6,8	7,3	10,4

- ✓ Abaissement de la teneur en eau de la terre

Cet effet ne se présente qu'à condition d'employer de la chaux vive. Un pourcentage de 1% de chaux abaisse la teneur en eau du sol de 1 à 1.5 point en moyenne. Une température élevée accélère la réaction de la chaux sur l'argile surtout en atmosphère très humide (Laurent GUÉRIN, 1985)

5.3. Le cycle de la chaux

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte Ca(OH)_2 peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive.

5.4. Dosage de la chaux

Des essais avec la terre retenue, comme dans le cas du ciment, sont indispensables, d'autant plus que le résultat sera fonction du pourcentage d'argile contenue dans la terre. Il faut pour stabiliser efficacement la terre, disposer d'une chaux de bonne qualité et broyée finement afin de pouvoir réaliser le mélange terre-chaux le plus intime possible. Dans le cas où une stabilisation à la chaux ou au ciment est possible, un pourcentage plus élevé de chaux que de ciment est généralement recommandé. A titre purement indicatif, et pour une terre argileuse, une bonne stabilisation à la chaux peut être obtenue, selon la terre, pour des pourcentages de 5 à 10% de chaux.

6. Principes de la 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 mécaniques de la terre (résistance à la compression, cohésion) en réduisant les vides entre les particules ou en améliorant ou en créant des liaisons entre celles-ci;

- ✓ réduire la sensibilité à l'eau (gonflement et retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules.

6.1. Moyen de stabilisation

Pour des terres non remaniées, la stabilisation s'opère généralement par injection ou par imprégnation. Mais cette technique est peu employée dans le domaine de la construction en terre, étant davantage appliquée aux travaux publics, aux ouvrages d'art, au traitement des fondations ou même dans le domaine de la préservation des monuments historiques.

Pour des terres remaniées, les procédés de stabilisation sont très nombreux et la littérature a produit divers systèmes de classification. Les stabilisants peuvent être classés selon leur nature ou bien leur forme.

6.2. Exemple de résultats obtenus sur la stabilisation par différentes auteurs

Diverses informations obtenues dans des œuvres différentes ont été montrées dans un tableau. En effet ce résultat a été obtenu par J.E OTI(2009) sur les briques comprimées stabilisées à la chaux suite à un mélange des matériaux GGBS (Ground Granulated Blatsfurnace Slag) stabilisés à la chaux. Ces résultats sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3: Résultats obtenus par J.E.OTI, J.M KINUTHI, 2009

Auteurs	Années	Matériel	Essais	Résultats					
				Echantillons		7 jours	28 jours	56 jours	90 jours
J.E. OTI, J.M. Kinuthi	2009	BTC stabilisée à la chaux	Résistance en compression simple	LG1	RCm	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

Ceci montre que la résistance des briques est proportionnelle au temps de conservation. En outre les briques stabilisées par la chaux hydraulique sont moins résistantes, ceci est dû en fonction de l'âge de la cure. Comparativement à celui obtenu par la chaux éteinte, on observe une évolution de la résistance à la compression.

Conclusion

En conclusion on peut dire que la résistance à la compression des BTC évolue en fonction de temps de conservation (confer tableau 3) et également en fonction de variété d'argile de stabilisant (confer tableau 2).

Chapitre 3 : IMPACTS DES BTC SUR LES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

La position du bloc de terre comprimée par rapport à d'autres matériaux de maçonnerie peut s'établir sur les aspects d'utilisation de matériau. Ainsi notre analyse sur ce point abordera les aspects suivants :

- ✓ L'aspect sanitaire ;
- ✓ L'aspect écologique ;
- ✓ L'aspect psychologique ;
- ✓ L'aspect confort et esthétique ;
- ✓ L'aspect développement durable.

1. Sur le plan sanitaire

Les solutions en BTC et autres matériaux locaux de construction n'émettent pas 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 CO₂ pour sa fabrication (.Hugo Houben, Hubert Guillaud CRATerre-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 peuvent être le vecteur de transmission de nombreuses maladies. Donc en choisissant de construire avec ces matériaux locaux, on limite l'émission des gaz (CO₂). En conclusion ces matériaux participent à la protection de l'environnement et au développement durable.

2. Sur le plan écologique

Les avantages des BTC sur le plan écologique concernent surtout la production des déchets. A ce propos il faut dire que les matériaux locaux sont récupérables et n'entraînent pas des déchets indésirables lorsque l'ouvrage est à détruire. Il est également très facile de recycler le débris des matériaux; Contrairement au béton armé où il faut d'abord dissocier les fers d'armature du béton.

3. Aspect psychologique

Cet aspect porte essentiellement sur la nature du matériau. Il ne faut pas manquer de souligner que depuis des années, la population mondiale a toujours utilisé la terre pour la construction de son habitat. De ce fait, malgré le mélange, elle a toujours des doutes sur la qualité des

matériaux locaux. Elle les qualifie de matériaux précaires et que construire en « terre » est l'apanage des pauvres. De ce fait, il faut essayer de sensibiliser la population en leur montrant également le côté positif de matériaux locaux et leur participation à la protection de l'environnement contrairement au ciment qui dégage des gaz qui risquent d'être nuisible à la santé.

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 important d'esthétique des bâtiments en bloc de terre comprimée 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'auto-régulation 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.

5. Sur le plan développement durable

La terre et l'argile font preuve d'une disponibilité en abondance dans presque toutes les régions. Leur transformation en matériau de construction (qui est recyclable) nécessite très peu, ou pas du tout d'énergie, et ne provoque pas d'émission de gaz à effet de serre. De ce fait, il est indubitable que les briques en blocs de terre comprimée participent au développement durable.

Chapitre 4 MATERIELS ET METHODES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre nous décrirons l'ensemble des méthodes et techniques utilisées dans le cadre de cette étude ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre.

Après prélèvements des échantillons en carrière, nous avons procédé respectivement à l'identification, à la caractérisation physique et mécanique des échantillons traités.

1. Caractéristique physique des matériaux

1.1 Essais d'identification

La première étape consiste à connaître l'échantillon des matériaux locaux provenant de la carrière en exploitation et dont la présente étude en fait l'objet.

L'identification correcte du matériau est essentielle pour décider de son utilisation ou de sa stabilisation. La reconnaissance de la terre s'effectue par des essais de terrain et des essais de laboratoire. Pour être utilisable la terre doit répondre aux critères de convenance spécifiques aux terres destinées à la production de BTC établis par l'expérience faisant mention des caractéristiques de texture, de plasticité et de compressibilité.

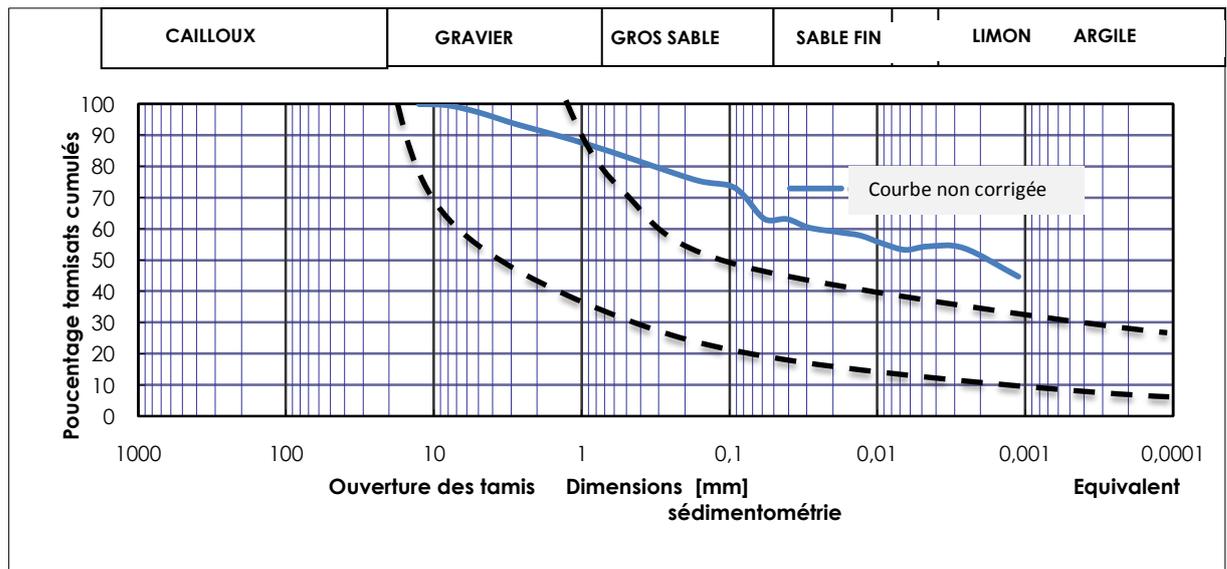
1.2 Essais de laboratoire

Nous avons fait une série d'essais pour identifier et déterminer les différents paramètres de nos sols. Nous avons donc fait les essais d'identification et quelques essais mécaniques ont été nécessaires pour la détermination des paramètres permettant d'utiliser dans le BTC. Les essais réalisés sont les suivants :

- ✓ La granulométrie,
- ✓ La sedimentométrie ;
- ✓ Le poids spécifique,
- ✓ Les limites d'Atterberg,
- ✓ L'essai Proctor modifié

Les analyses granulométriques et sedimentométrique ont montré que les échantillons de carrière sont des sols argileux, la courbe granulométrique sort du fuseau recommandé pour la fabrication de BTC. La figure suivante montre le graphe de la courbe granulométrique non corrigée de l'échantillon étudié. Ainsi une stabilisation au sable était faite afin de corriger l'allure de la courbe granulométrie du matériau étudié (voir figure 3 et 4).

Figure 3: courbe granulométrique non corrigée



Résultats des essais

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques, accompagnés du tableau des résultats. Ce tableau contient en fonction de la série de tamis utilisés la masse des refus et le pourcentage des passants ; il permet de tracer la courbe granulométrique.

Tableau 4: Caractéristiques géotechniques du matériau

Matériaux	Granulométrie					Limites d'Atterberg			Compactibilité		Densité
	%<2,5mm	%<2mm	%<0,08mm	%<0,015mm	%<0,002mm	Wl %	Wp %	Ip %	γ_d g/cm ³	Wopm %	KN/m ³
Carrière de Loumbila	95%	93%	38%	30%	19%	33	18,6	14,4	1,83	14,9	27,4

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés sous forme d'une courbe appelée courbe granulométrique qui donne le pourcentage cumulé d'éléments de dimension inférieure à chaque diamètre. Les plus gros grains sont de l'ordre de 2,5 mm de diamètre. Le matériau convient à la fabrication des blocs de terre comprimée après ajout du sable. Les critères complémentaires $f \times IP$ sont vérifiés.

La figure suivante représente la courbe granulométrique de l'échantillon corrigé :

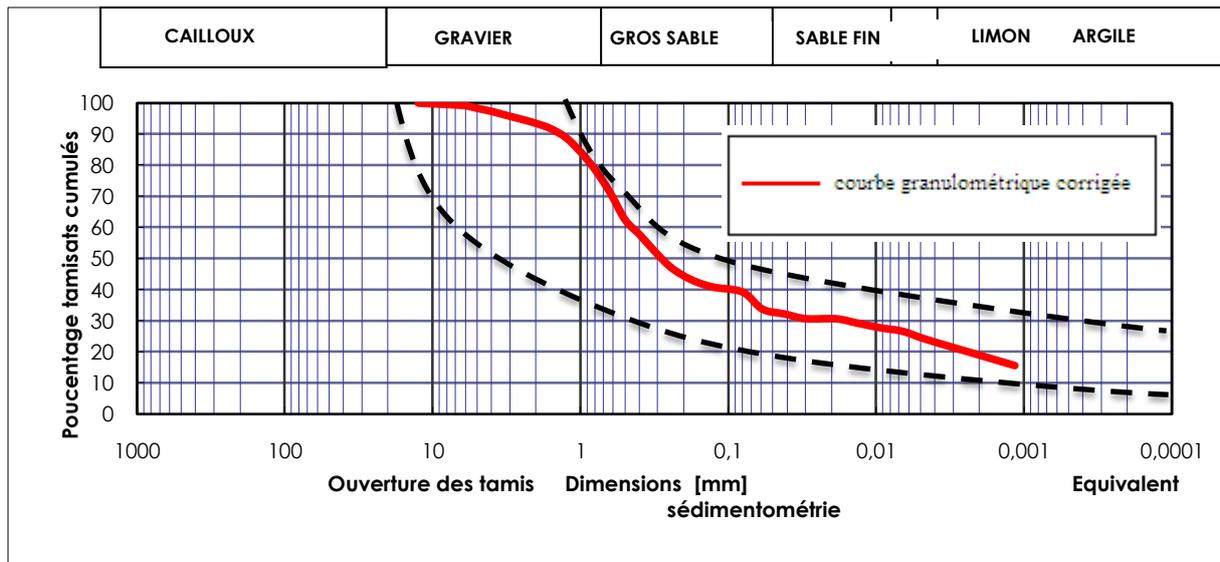


Figure 4: Intervalle de confiance de la courbe granulométrique.

Cette courbe granulométrique se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance appelé fuseau et recommandé pour la fabrication des BTC. Ce qui nous permet de justifier le choix de ce matériau pour la production des BTC afin de poursuivre le reste des essais au laboratoire.

2. Caractérisation mécanique des briques

2.1 Les matériaux disponibles pour la production et test de BTC

a) Le malaxeur

La répartition de stabilisant doit être homogène pour que son effet soit égal pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage. Plus il sera homogène et plus le taux de stabilisation pourra être réduit. Généralement le temps de malaxage est très réduit afin d'éviter la prise anticipée de stabilisant et la création des corps solides néfastes à la résistance mécanique des blocs. Le malaxage se fait d'abord à sec puis on ajoute progressivement de l'eau si nécessaire. Un exemple de malaxeur s'aperçoit sur la figure 5.



Figure 5: Malaxeur à axe

b) La presse

L'amélioration de la densité, c'est-à-dire la diminution de la porosité de la terre est obtenue en comprimant la terre avec une 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. 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 6: la Presse manuelle TERSTARAM

2.2 Méthodes expérimentales

Le protocole expérimental a pour but de préciser les différents essais auxquels le matériau sera soumis, puis de caractériser et optimiser les procédés. Ensuite il faut évaluer les propriétés du matériau ainsi que les qualités du procédé de fabrication et d'amélioration du matériau exécuté. Enfin il faut interpréter les résultats obtenus afin d'améliorer la fiabilité du procédé utilisé.

La méthodologie utilisée pour notre projet comporte trois phases essentielles. Il s'agit de :

- ✓ Planification
- ✓ L'exécution
- ✓ L'analyse des résultats

a) La planification

Il s'agit ici de définir la problématique et les objectifs du projet à réaliser.

b) Exécution

Il s'agit de préparer l'échantillon de terre prélevé depuis la **carrière et** de procéder au tamisage afin de garder les grains dont les diamètres sont inférieurs ou égal à 6mm, ce qui correspond au diamètre du tamis. Il faut noter que la terre prélevée au niveau de la carrière contient

environ 72% d'argile d'après les premiers résultats obtenus au laboratoire de GC du 2iE (Kamboinsé).

Nous avons ensuite repris les essais après ajout de sable puis nous avons obtenu 19% d'argile dans l'échantillon à prendre en compte pour la stabilisation à la chaux. La stabilisation sera faite d'abord pour un échantillon de terre avec de la chaux à 5% puis après à 10% et enfin à 15%.

c) Analyse des résultats

Les différents essais réalisés à partir d'un échantillon de terre contenant 19% d'argile stabilisé avec de la chaux (5%-10%-15%). Ont été réalisés sur 40 briques stabilisées à 5% puis 40 autres stabilisées à 10% et enfin 40 briques à 15%. Les briques destinées à la compression sont des demi-blocs de dimensions nominales 14 x 14 x 9 cm et des briques entières de dimensions nominales 29,5x14x14 cm.

La quantité d'eau à ajouter est prise en fonction du volume de matériaux et du liant. Cette quantité est ensuite ajoutée progressivement jusqu'à l'obtention de la teneur recommandée conférer tableau 5.

Tableau 5 :Quantité des mélanges réalisés

Quantité de matériau	Quantité d'eau
100 litres de terrés	20 litres d'eau

3. Production des BTC au laboratoire du site de Ouagadougou

La phase de production requiert beaucoup d'attention et de précision dans le dosage des différents matériaux avant le malaxage. Pour avoir un mélange homogène des constituants (minéraux, de l'eau, du stabilisant), il faut briser les mottes jusqu'à $\varnothing > 200\text{mm}$, car il faut avoir au moins 50% de grains de $\varnothing < 5\text{mm}$. Le dosage se fait par pourcentage désiré. Le dosage de la chaux se fait d'abord pour 5% puis pour 10% puis enfin pour un dernier essai à 15% de la quantité de matériau contenu dans le malaxeur. Comme indiqué dans le tableau 5 l'eau est ensuite ajoutée progressivement jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène à la

teneur en eau optimale et ceci après un temps de malaxage continu. Et ensuite on passe le matériau à la presse pour la production.

4. Condition de cure

Les conditions de conservation des briques dans le temps jouent un rôle très important dans l'évolution de leur résistance. Des soins apportés dans la fabrication et la conservation peuvent éviter des baisses et des dispersions important des résistances. Pour les blocs stabilisés à la chaux éteinte, la présence d'eau à l'intérieur des blocs est indispensable pour que le stabilisant atteigne sa résistance maximale, une température élevée va également contribuer à la prise. Les blocs doivent non seulement être abrités du soleil et du vent, mais aussi maintenus en ambiance humide et chaude : risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissure de retrait. Pour notre cas ici, les briques produites sont ensuite soumises à une condition de cure sous un film plastique afin de conserver la teneur en eau et en stabilisant pour éviter des prises rapides, inutiles et néfastes pour l'utilisation des BTC. Les essais d'écrasement se font à des intervalles de 7, 14, et 28jours.



Figure 7: Stockage des briques

5. Essais de compression

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des briques. Les essais de résistance à la compression sont réalisés sur des BTC produites par la presse. Ces briques sont écrasées à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la construction. La presse utilisée pour cet essai d'écrasement est la presse électrique du laboratoire d'éco-matériau du 2iE du site de Ouagadougou.



Figure 8: Presse électrique

6. Mode opératoire pour les essais de résistance à la compression

Les essais mécaniques s'appliquent indifféremment sur les blocs secs. Les résultats sont étroitement liés aux sollicitations pendant la fabrication et la cure des matériaux. Les résultats doivent mentionner tous les paramètres utiles pour la bonne caractérisation de l'échantillon à savoir : les dimensions, la teneur en eau résiduelle, et la densité sèche des échantillons.

❖ Principe :

Il s'agit de soumettre un échantillon de deux demi blocs superposés selon le norme exigé par GRATERre à une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre compressée.

❖ Mode opératoire :

- Poser l'ensemble de l'échantillon des deux briques dans la presse (électrique dans notre cas) ;
- Placer l'ensemble (les deux briques et le système de anti-fretage) 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. De même la machine (dispositif composé d'un pupitre) enregistre toutes les mesures de pression et déplacement des blocs elle a pour capacité maximale 1500kN et d'un capteur de type LVDT.

❖ Expression des résultats

La résistance à la compression des blocs est donnée par la formule $R_c = 10 \times F/S$ dans laquelle :

R_c : est la résistance à la compression des blocs en méga pascal (MPa)

F : est la charge maximale supportée par les deux briques en kilo newtons (kN)

S : est la surface de moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm²)

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.

7. Présentation des résultats des écrasements

a) Résultat à 7 jours

Les résultats des essais à 7 jours sont regroupés dans le tableau ci-dessous. Les valeurs des contraintes ont été lues directement dans le graphe de la courbe représentant les contraintes et les déformations.

Tableau 6 des essais d'écrasement à 7 jours

Dosage (%)	Surface (mm ²)	Charge de rupture (kN)		Résistance à la compression (MPa)	
		Charge	Moyenne	Résistance	Moyenne
Matériau non stabilisé	19390,5	15,53	14,38	0,80	0,74
	19460,2	14,24		0,73	
	19530	13,37		0,68	

b) Interprétation

On constate que les résultats de la résistance à la compression obtenus en appliquant la formule énumérée dans le mode opératoire ne sont en réalité que les valeurs des contraintes

de rupture lues directement sur la courbe contrainte-déformation. Pour l'écrasement à 7 jours la valeur de la résistance à la compression varie de 0,68-0,73-0,80 dont la moyenne est égale à 0,74 MPa.

c) Résultat à 14 jours

Les résultats des essais à 14 jours sont regroupés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 7 : Essais d'écrasement à 14 jours

Dosage (%)	Surface (mm ²)	Charge de rupture(kN)		Résistance à la compression (MPa)	
		Charge	Moyenne	Résistance	Moyenne
5	19600	20,28	19,56	1,03	1,01
	19321	17,25		0,89	
	19460	21,15		1,08	
10	19460	23,74	23,30	1,22	1,20
	19530	24,15		1,23	
	19230,75	22,01		1,14	
15	19390,5	20,28	23,44	1,04	1,21
	19530	25,03		1,28	
	19460	25,02		1,29	

d) Interprétation

Les valeurs de la résistance à la compression obtenue avec un dosage de 5% sont respectivement égales à 1,03-0,89 et 1,08 MPa dont la moyenne est 1,01MPa et celles avec un dosage de 10% donnent respectivement 1,22-1,23 et 1,14MPa dont la moyenne fait 1,20MPa et celles avec un dosage de 15% donne les valeurs 1,04-1,28 et 1,29MPa dont la moyenne est égale à 1,21MPa. On constate qu'une des valeurs à 5% (1,08 MPa) est relativement supérieure à une valeur à 15% (1,04 MPa), ceci est dû à deux hypothèses probables soit la brique testée à 15% a été mal compressée, soit il y a eu une prise rapide et la brique a perdu ses caractéristiques.

Résultat à 28 jours

Les résultats des essais à 28 jours ont été regroupés dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 8 : Essais d'écrasement à 28 jours

Dosage(%)	Surface (mm ²)	Charge de rupture(kN)		Resistance 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	

e) Interprétation

Ici la valeur de la résistance à la compression avec un dosage de 10% est (0,89 MPa) et celle des briques non stabilisée (0,90 MPa), sont pratiquement égales car la différence est de 0,01 MPa, ce n'est pas du tout satisfaisant car habituellement les valeurs de la résistance augmentent en fonction du dosage ce qui n'est pas le cas dans le présent essai. Par contre les valeurs de la résistance à la compression avec les briques non stabilisée, et des briques stabilisées à 5%, et 15% sont respectivement égales à 0,90 MPa, 1,33 MPa et 1,56 MPa. On sent l'augmentation au fur et mesure que le dosage augmente.

8. Conclusion sur les valeurs des résistances à la compression

Les résultats observés dans les différents tableaux indiquent que les valeurs des différents essais de compression augmentent tous en fonction du dosage et du temps de cure. Ainsi on peut remarquer la différence entre les valeurs telles que les valeurs de l'écrasement à 14 jours

on a: 1,01 MPa pour un dosage de 5%, 1,20 MPa pour un dosage de 10% et 1,21 MPa pour un dosage de 15%. Ces valeurs sont en effet plus grandes que la valeur des briques non stabilisées qui est de 0,74 MPa. Si l'on retient cette dernière valeur comme valeur de référence, on peut affirmer que la résistance à la compression des briques augmente en fonction du dosage. Néanmoins il faut constater que les valeurs des résistances à la compression à 14 jours pour les dosages de 10% et 15% sont respectivement égales à 1,20 MPa et 1,21 MPa : la différence est infime. Cependant à 28 jours l'écrasement à 0% donne une valeur de référence de 0,90 MPa tandis que pour un dosage de 5%, 10% et 15%, on obtient respectivement les valeurs suivantes : 1,33 MPa, 0,89 MPa et 1,56 MPa. Il faut ici dire que la valeur 0,89 MPa est faible par rapport à la valeur de référence de 0,90 MPa. Par contre les valeurs obtenues avec un dosage à 5% et 15% sont acceptables par rapport à la référence. Elles sont non seulement supérieures à la référence mais aussi plus grandes que celles obtenues en ayant écrasé à 7 jours et à 14 jours, ce qui nous permet de dire que ces différentes valeurs augmentent non seulement en fonction du dosage mais aussi en fonction du temps de cure.

9. Récapitulatif des moyennes des valeurs du Module de Young en MPa

le tableau 9 ci-dessous montre le récapitulatif des moyennes des valeurs du module de Young de l'échantillon écrasé à 7, 14 et 28 jours avec les différents dosages 0%, 5%, 10 % et 15%. Les détails sont en annexe du document.

Tableau 9: Valeurs moyenne de module de Young E_t et E_s .

Dosage(%)	ε_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	E_t [MPa]
A 7 jours				
0	0,013	0,74	58,44	83,21
A 14 Jours				
5	0,013	1,01	70 ,05	79,03
10	0 ,04	1,19	88,07	94,37
15	0,013	1,12	92,25	114,37
A 28 jours				
0	0,012	0,9	74,14	88,25
5	0,013	1,32	104,25	107,01
10	0,01	0,882	94,44	112,11

15	0,011	1,57	144	193,08
----	-------	------	-----	--------

Observations :

A 7 jours la valeur de E_t est 83,21MPa à 0%, à 14 jours, les valeurs de E_t varient de 79,03 MPa cette valeur est plus petite que 83,21MPa comme nous avons dit plus précédemment ceci est dû à deux hypothèses probables soit la brique testée à 15% a été mal compressée, soit il y a eu une prise rapide et la brique a perdue ses caractéristiques à 5% tandis qu'à 10% on a 94,37MPa et à 15% on a 114,37MPa. On peut dire que ces valeurs augmentent en fonction du dosage. Mais à 28 jours ces valeurs sont d'autant plus grandes que les précédentes. Elles sont respectivement égales à 88,25MPa à 0%, 107,01MPa à 5%, 112,11MPa à 10% et 193,08MPa à 15%. On peut dire alors que les valeurs du module de Young augmentent également en fonctions de la durée de cure.

En résumé, on constate que les valeurs du module de Young augmentent avec le temps de cure et en même temps en fonction du dosage.

10. Teneurs en eau de l'échantillon

Les briques ont été testées l'échantillon prélevé est pesé et mis à l'étuve pendant 24h pour voir leur teneur en eau et les valeurs ont été regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 10: Valeurs moyenne de teneur en eau de l'échantillon

Dosage	Teneur en eau moyenne
Ecrasement à 7 jours	
Stabilisation à 0%	$(39,36+31,74+33,7)=34,93$
Ecrasement à 14 jours	
Stabilisation à 5 %	$(32,69+40,12+34,71)=36,55$
Stabilisation à 10%	$(36,71+39,31+34,71)=36,91$
Stabilisation à 15%	$(39,6+20,07+26,58)=28,75$

Ecrasement à 28 jours	
Stabilisation à 0%	(7,9+8,7+9,3)=8,63
Stabilisation à 5%	(7,7+16,27+14,5)=12,8
Stabilisation à 10%	(14,8+16,4+16)=15,76
Stabilisation à 15%	(14,5+22,1+13,7)=16,76

La teneur en eau à 14 jours pour la stabilisation à 10% est égale à 36,91% alors qu'à 28 jours cette valeur a chuté de la moitié pratiquement (15,76%). On constate la même variation au niveau des briques stabilisées à 15% à 14 jours on a 28,75% et à 28 jours on 16,76%. Ce qui montre que les briques deviennent de plus en plus sèches en fonction de la durée de conservation.

Remarque: On remarque que la teneur en eau diminue avec le temps. Elle devient relativement faible en fonction du temps de conservation.

11. Résistance à la flexion à 32 jours

a) Méthodologie

Un bloc test entier de format 29,5x14x9cm est posé sur deux tubes de 25mm de diamètre espacés de 20 cm on charge avec soin le bloc avec le jeu de la manivelle jusqu'à la rupture du bloc et ensuite on fait la lecture de la force de rupture sur l'écran.

b) Résultats

Détermination de σ

$$\sigma = 1,5 \cdot \frac{Fl}{bh^2}$$

Tableau 11: Récapitulatif de résistance à la flexion

Dosage	N° de brique	F [N]	l [cm]	b [cm]	h [cm]	σ [MPa]
0	AT	0,85	24,2	13,5	9	0,28
	BT	0,72	24,2	14	9	0,23
	CT	0,78	24,3	14,02	9	0,25
Moyenne		0,78				0,25
5	AH	1,17	24,3	14	9	0,38
	BH	1,07	24,4	14	8,9	0,35
	CH	1,27	24,3	14	9	0,41
Moyenne		1,17				0,38
10	AF	1,14	24,4	14	9	0,37
	BF	1,47	24,3	14	9	0,47
	CF	1,33	24,5	13,4	8,9	0,46
Moyenne		1,313				0,43
15	AG	16,88	24,4	14	8,4	6,25
	BG	1,56	24,3	14	8,5	0,56
	CG	1,74	24,6	13,4	8,9	0,60
Moyenne		6,73				2,47

Interprétation

Comme le témoigne le tableau ci-dessus, on observe un accroissement général de la résistance à la flexion des briques en fonction du dosage. La résistance à la flexion des briques croît progressivement avec la teneur en chaux. La résistance moyenne maximale est atteinte avec une teneur de 15% de chaux à laquelle la résistance moyenne est de 2,47 MPa. 0,43 MPa Pour un dosage de 10% et 0,38 MPa pour un dosage 5%. Ces valeurs sont en effet plus grandes que la valeur des briques non stabilisées qui est de 0,25 MPa. 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.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, la stabilisation à la chaux augmente les caractéristiques mécaniques des BTC en vue de les rendre plus pratiques dans la construction des habitations. Ainsi la résistance à la compression à 28 jours obtenue avec une stabilisation à 15% est égale à 1,56 MPa alors que les briques non stabilisées ont une résistance à la compression de 0,90 MPa. De même, à 14 jours la stabilisation à 5% donne une résistance de 1,01 MPa et celle à 10% donne une valeur de 1,20 MPa. Ce qui nous permet de dire que la résistance à la compression des BTC augmente en fonction du dosage et du temps de conservation. Les valeurs du module de Young calculées à 14 jours pour les stabilisations à 5%, 10% et 15% donnent respectivement les valeurs 79,05MPa, 94,37MPa et 114,37MPa tandis qu'à 28 jours elles sont respectivement égales à 88,25MPa, 107,01MPa, 112,11 et 193,08 MPa. On peut affirmer que le module de Young du matériau étudié augmente également en fonction du temps de cure et du dosage.

Les teneurs en eau à 14 jours pour la stabilisation à 5%, 10% et 15% sont respectivement égales à 36,50%, 37,87% et 28,75% alors qu'à 28 jours ces valeurs ont chuté et deviennent respectivement 12,8%, 15,76% et 16,76%. Ce qui montre que les briques deviennent de plus en plus sèches en fonction de la durée de conservation.

Quant à la résistance à la flexion, les résultats des essais à 28 jours donnent 0,25MPa, 0,38MPa, 0,43MPa et 2,47MPa pour les dosages respectifs de 0%, 5%, 10% et 15%. Donc cette résistance croît avec l'augmentation du dosage en stabilisant. Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que l'ajout de stabilisant (la chaux) améliore remarquablement les caractéristiques mécaniques du matériau. La résistance à la compression est d'autant meilleure par rapport au matériau non stabilisé de même que la résistance à la flexion.

Par ailleurs les résultats que nous avons eus après ces travaux ne sont pas satisfaisants aux attentes car ils sont inférieurs aux résultats obtenus dans le tableau 3 par J.E. OTI, J.M. Kinuthi 2009; cela peut s'expliquer éventuellement par la lenteur de prise de la chaux et de la qualité de terre utilisée ;

Nous recommandons pour les futures recherches, que les chercheurs puissent varier la quantité d'argile afin de déterminer la résistance caractéristique avec comme stabilisant la chaux pour apprécier leur performance. 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. Le bloc de terre comprimée : Elément de base, CRATerre, 1991
2. Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, GRATerre- EAG, Blocs de terre comprimée, Manuel de conception et de production. Volume II, 1995.
3. Laurent GUERIN, Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics ,1985
4. J.E Oti, J.M. Kinuthia, 2009,Engineering properties of unfired clay masonry bricks
5. Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, GRATerre- EAG, Blocs de terre comprimée, Manuel de conception et de production. Volume II, 1995
6. Alfred B. Ngowi , 1997, Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana
7. URS WYSS, ING.CIV.DIPL.EPFL -La construction en « matériaux locaux>>, Ouagadougou janvier, 2006
8. Vincent Rigassi, GRATerre-EAG, Blocs de Terre Comprimée, Manuel de production Volume I, 1995
9. 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
10. Traité de construction en terre Hugo Houben, Hubert Guillaud, CRATerre-EAG ,1995
11. Le bloc de terre comprimée ; YAMBA Tiémoko, Nov.1995
12. Etude Comparative Amélioration des Briques en Terre Comprimée Stabilisée par le ciment et la chaux, Mahamat Saleh Ibrahim mémoire de fin d'Etude de master2, 2ie juin.2010

ANNEXES

<i>ANNEXE 1:Analyse granulométrique par tamisage</i>	<i>36</i>
<i>ANNEXE 2: L'analyse granulométrique par sedimentométrie.....</i>	<i>37</i>
<i>ANNEXE 3:Les limites d'Atterberg-méthode à la coupelle.....</i>	<i>38</i>
<i>ANNEXE 4:Essai proctor normal</i>	<i>39</i>
<i>ANNEXE 5 : Le Teneur en eau</i>	<i>40</i>
<i>ANNEXE 6:Récapitulatif des essais d'écrasement</i>	<i>43</i>
<i>ANNEXE 7: Courbe contrainte-déformation des blocs non stabilisés et écrasés à 7jrs.....</i>	<i>44</i>
<i>ANNEXE 8:Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 5%, écrasées à 14jrs</i>	<i>45</i>
<i>ANNEXE 9:Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 10% de chaux, écrasées à 14jrs.....</i>	<i>46</i>
<i>ANNEXE 10:Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 15% de chaux et écrasées à 14jrs.....</i>	<i>47</i>
<i>ANNEXE 11:Courbe contrainte-déformation des blocs non stabilisés, écrasé à 28jrs.....</i>	<i>48</i>
<i>ANNEXE 12:Courbe contrainte-déformation des blocs dosés 5%, écrasés à 28jrs.....</i>	<i>49</i>
<i>ANNEXE 13:Courbe contrainte-déformation des blocs dosés à 10% et écrasées à 28jrs.....</i>	<i>50</i>
<i>ANNEXE 14:Courbe contrainte-déformation des blocs dosés à 15% et écrasées à 28jrs.....</i>	<i>51</i>

ANNEXE 1:Analyse granulométrique par tamisage

ANALYSE GRANULOMETRIQUE 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	5,7	5,7	0,2%	99,8%	
41	10	0,0	5,7	0,2%		
40	8	0,0	5,7	0,2%		
39	6,3	21,3	27,0	0,9%	99,1%	
38	5	28,3	55,3	1,8%	98,2%	
37	4	29,6	84,8	2,8%	97,2%	
36	3,15	39,6	124,4	4,1%	95,9%	
35	2,5	36,9	161,3	5,4%	94,6%	
34	2	39,1	200,3	6,7%	93,3%	
33	1,6	49,5	249,9	8,3%	91,7%	
32	1,25	89,3	339,2	11,3%	88,7%	
31	1	136,8	476,0	15,9%	84,1%	
30	0,8	167,3	643,3	21,4%	78,6%	
29	0,63	224,7	868,0	28,9%	71,1%	
28	0,5	259,4	1 127,4	37,6%	62,4%	
27	0,4	141,2	1 268,6	42,3%	57,7%	
26	0,315	163,0	1 431,6	47,7%	52,3%	
25	0,25	144,3	1 575,8	52,5%	47,5%	
24	0,2	92,4	1 668,2	55,6%	44,4%	
23	0,16	64,7	1 732,9	57,8%	42,2%	
22	0,125	44,6	1 777,5	59,2%	40,8%	
21	0,1		1 777,5	59,2%		
20	0,08	46,6	1 824,0	60,8%	39,2%	
19	0,063					
18	0,050					
17	0,040					

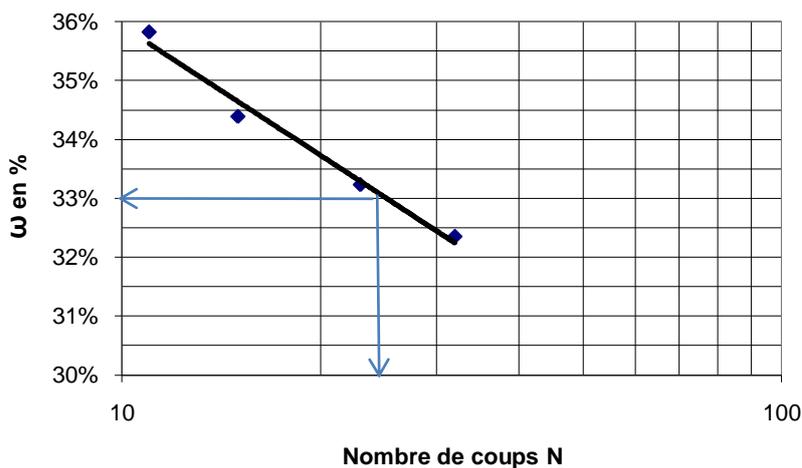
ANNEXE 2: L'analyse granulométrique par sédimentométrie

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

Heures to =	Temps cumulé tc de lecture	Lecture R	Température T °c	Correction Ct+Cm-Cd	Lecture corrigée Rc	Profondeur effective Hr (cm)	Facteur F	Diamètre équivalent Φ (μm)	Pourcentage des grains < Φ P (%)	Passant échantillon p ($p = C.P$) en %
10:56:00	30 s	1006,5	33,3	4,4	1010,9	13,5	0,88	59	86,1%	33,7%
10:57:00	1 min	1006,0	33,3	4,4	1010,4	13,6	0,88	42	82,1%	32,2%
10:58:00	2 min	1005,5	33,3	4,4	1009,9	13,7	0,88	30	78,2%	30,7%
11:01:00	5 min	1005,5	33,3	4,4	1009,9	13,7	0,88	19	78,2%	30,7%
11:06:00	10 min	1005,0	33,4	4,5	1009,5	13,8	0,88	13	74,5%	29,2%
11:16:00	20 min	1004,5	33,5	4,5	1009,0	13,9	0,88	9	70,9%	27,8%
11:36:00	40 min	1004,0	33,9	4,6	1008,6	14,0	0,87	7	68,0%	26,6%
12:16:00	80 min	1003,0	34,5	4,8	1007,8	14,2	0,87	5	61,7%	24,2%
14:56:00	4 h	1001,5	35,7	5,2	1006,7	14,4	0,86	3	53,0%	20,8%
10:56:00 J+1	24 h	1001,0	32,2	4,1	1005,1	14,7	0,89	1	39,9%	15,6%

ANNEXE 3: Les limites d'Atterberg-méthode à la coupelle

N° tare	Limite de liquidité					Limite de plasticité			
	1	2	3	4	5	A	B	C	D
Poids total humide (g)	21,86	17,11	15,98	16,22		11,26	11,22	10,96	10,39
Poids total sec (g)	18,02	14,61	13,80	14,02		10,69	10,56	10,39	9,90
Poids tare (g)	7,30	7,34	7,24	7,22		7,38	7,29	7,32	7,24
Poids de l'eau (g)	3,84	2,50	2,18	2,20		0,57	0,66	0,57	0,49
Poids sec (g)	10,72	7,27	6,56	6,80		3,31	3,27	3,07	2,66
Teneur en eau (g)	35,8%	34,4%	33,2%	32,4%		17,2%	20,2%	18,6%	18,4%
Nombre de coups N	11	15	23	32					



RESULTATS

$\omega_L = 33,0\%$

$\omega_P = 18,6\%$

$\omega = 12$

Indice de plasticité :

$I_P = \omega_L - \omega_P$

$I_P = 14,4\%$

Indice de consistance du terrain naturel :

$I_c = (\omega_L - \omega) / I_P$

$I_c = 2,1$

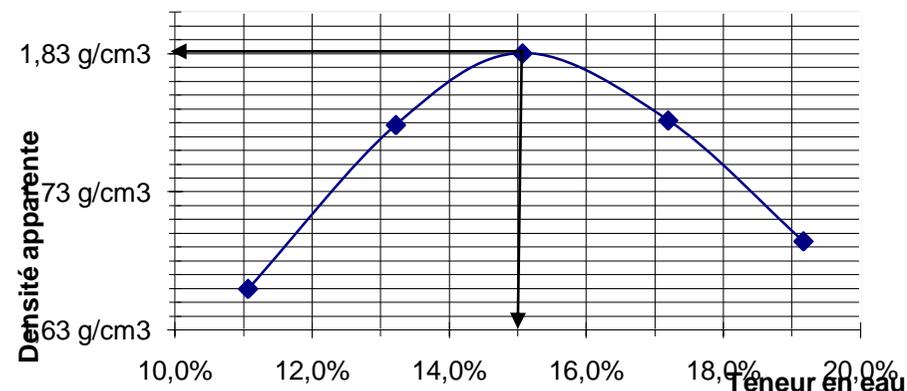
ANNEXE 4:Essai proctor normal

Teneur en eau souhaitée		10%	12%	14%	16%	18%					
Eau de mouillage		300	360	420	480	540					
Densité	Poids total humide (g)	3910	4070	4157	4140	4075					
	Poids du moule (g)	2178	2178	2178	2178	2178					
	Poids net humide (g)	1732	1892	1979	1962	1897					
	Volume du moule (cm ³)	940	940	940	940	940					
Teneur en eau	Numéro tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids tare (g)	17,6	17,8	17,2	17,4	18,3	19,8	19,5	17,8	17,8	19,3
	Poids total humide (g)	97,3	112,3	100,3	100,1	84,0	84,8	93,8	99,6	106,1	94,1
	Poids total sec (g)	90,1	102,1	91,0	90,0	75,2	76,5	82,9	87,6	92,0	82,0
	Teneur en eau (%)	10,0%	12,1%	12,6%	13,9%	15,5%	14,7%	17,1%	17,3%	19,0%	19,3%
Teneur en eau moyenne (%)		11,1%		13,2%		15,1%		17,2%		19,2%	
Densité humide γ (g/cm ³) :		1,84		2,01		2,11		2,09		2,02	
Densité sèche γ_d (g/cm ³) :		1,66		1,78		1,83		1,78		1,69	

OPN

Teneur en eau ω (%) : **14,9**

Densité sèche γ_d (g/cm³) : **1,83**



ANNEXE 5 : Le Teneur en eau

Les briques ont été testées et les valeurs des teneurs en eau ont été regroupées dans le tableau ci-dessous.

En général le teneur en eau se calcul de la manière suivante :

$$.w(\%) = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

W(%)=teneur en eau

Ph=poids humide

Ps=poids sec

Briques non stabilisée écrasé à 7 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne de w(%)
	1AF	(490,08-451,44)=39,36	34,93
	2AF	(452,77-421,03)=31,74	
	3AF	(428-394,3)=33,7	
Briques dosées à 5% écrasé à 14 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	AKN	(482,05-449,36)=32,69	36,55
	BKN	(581,98-541,86)=40,12	
	CKN	(530,93-494,07)=36,86	
Briques dosées à 10% écrasé à 14 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne

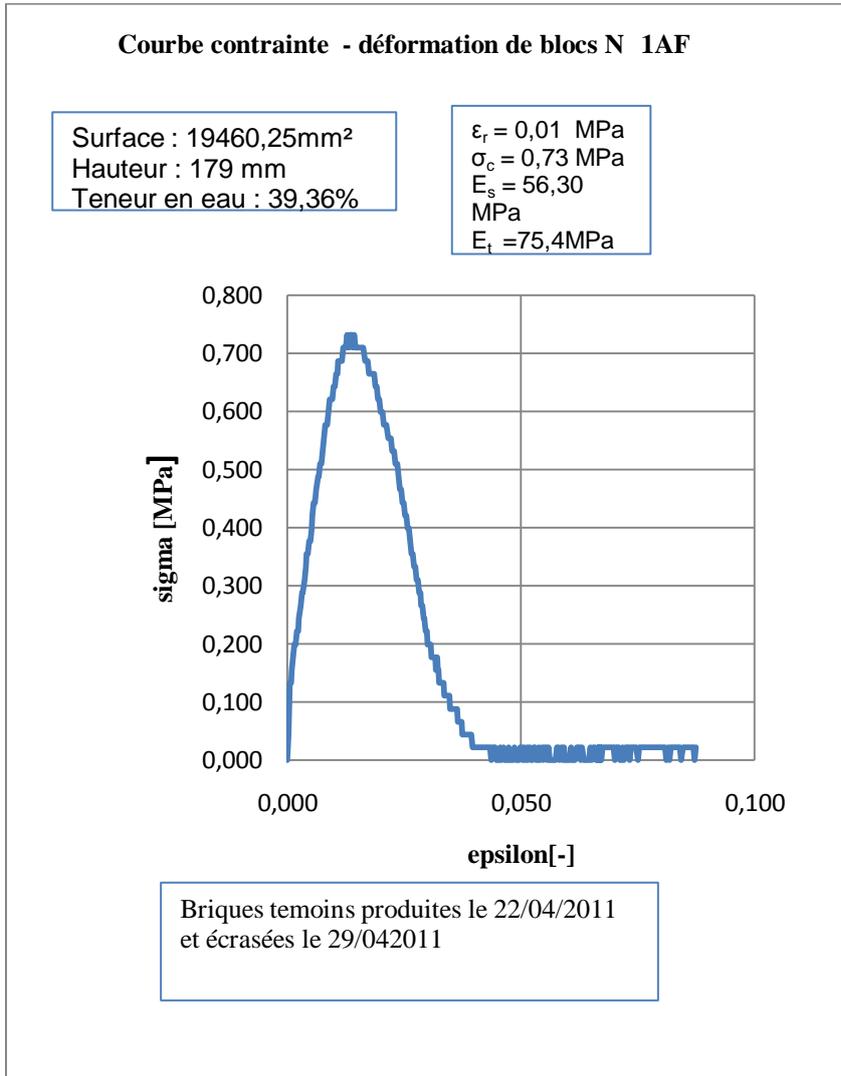
	ALM	$(496,04-459,33)=36,71$	36,91
	BLM	$(518,45-479,14)=39,31$	
	CLM	$(518,14-483,43)=34,71$	
Briques dosées à 15% écrasé à 14 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	ART	$(470,37-430,77)=39,6$	28,75
	BRT	$(473,96-453,89)=20,07$	
	CRT	$(477,86-451,28)=26,58$	
Briques non stabilisé écrasé à 28 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	AG	$(314,7-306,8)=7,9$	8,63
	BG	$(406,7-398)=8,7$	
	CG	$(421,3-412)=9,3$	
Briques dosée à 5% écrasé à 28 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	AN	$(420,5-412)=7,7$	12,8
	BN	$(455,1-438,7)=16,2$	

	CN	(422,1-407,6)=14,5	
Briques dosée à 10% écrasé à 28 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	AK	14,8	15,73
	BK	16,4	
	CK	16	
Briques dosées à 15% écrasé à 28 jours			
Teneur en eau	N° de test	Ph(g)-Ps(g)	Moyenne
	AM	14,5	16,76
	BM	22,1	
	CM	13,7	

ANNEXE 6:Récapitulatif des essais d'écrasement

Type d'essai	Matériaux utilisé pour l'essai (dosage)	Date de production	Date d'écrasement	Résistance à la Compression moyenne en MPa	Observation
Ecrasement à 7 jours					
écrasement	Stabilisation à 0%	22/04/11	29/04/11	0,739	Valeur de référence
Ecrasement à 14 jours					
écrasement	Stabilisation à 5%	22/04/11	06/05/11	1,005	Valeur acceptable
écrasement	Stabilisation à 10%	22/04/11	06/05/11	1,201	Valeur acceptable
écrasement	Stabilisation à 15%	22/04/11	06/05/11	1,205	Proche de la précédente
Ecrasement à 28 jours					
écrasement	Stabilisation à 0%	22/04/11	20/05/11	0,900	Valeur acceptable
écrasement	Stabilisation à 5%	22/04/11	20/05/11	1,334	Valeur acceptable
écrasement	Stabilisation à 10%	22/04/11	20/05/11	0,889	Faible par rapport aux autres écrasements
écrasement	Stabilisation à 15%	22/04/11	20/05/11	1,564	Valeur acceptable

ANNEXE 7: Courbe contrainte-déformation des blocs non stabilisés et écrasés à 7jrs



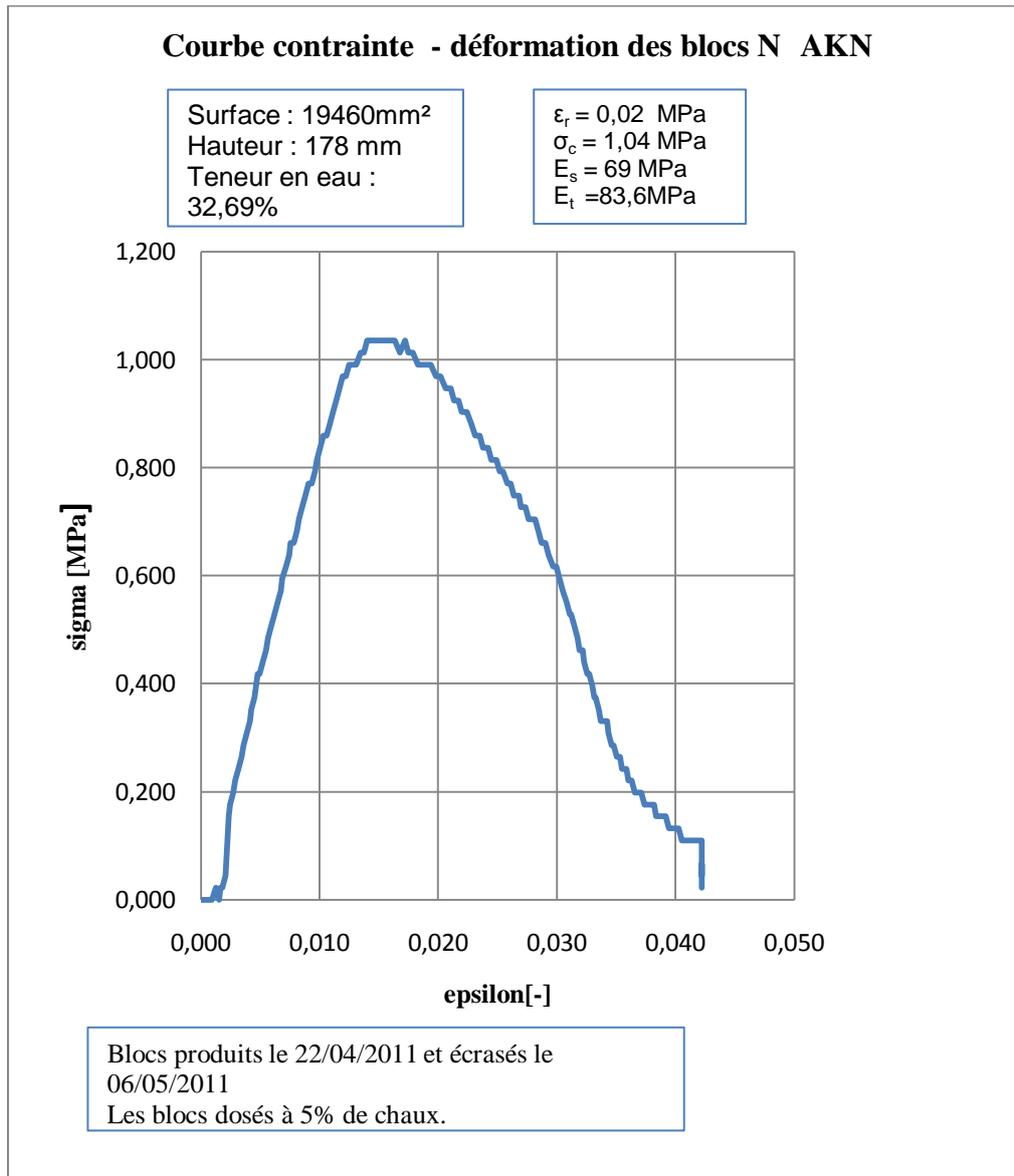
a) Après avoir lu la valeur sigma et epsilon sur la courbe contrainte-déformation, nous avons calculé le module de Young tangentiel (E_t) et le module de Young sécant (E_s). En général le module de Young est donné par la formule suivante :

b) $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$

Valeurs de module de Young E_t et E_s des briques écrasées à 7 jours ci-dessous

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t MPa]
0	1Af	0,01	0,73	56,30	0,01	0,38	75,4
	2AF	0,01	0,80	61,61	0,00	0,43	108
	3AF	0,01	0,69	57,41	0,01	0,53	66,25

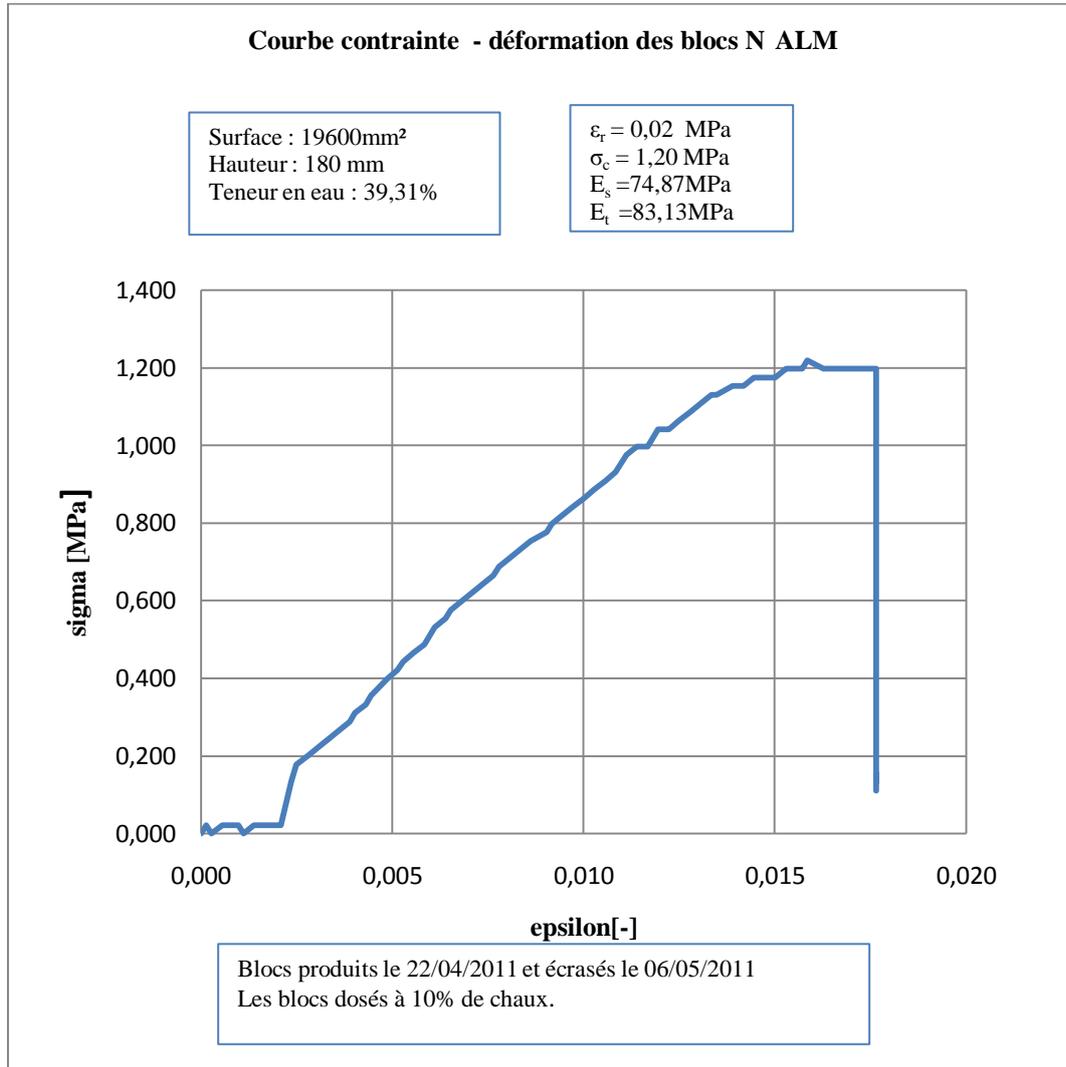
ANNEXE 8: Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 5%, écrasées à 14jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s des briques écrasées à 14 jours

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
5	AKN	0,02	1,04	69	0,01	0,42	83,6
	BKN	0,013	0,89	68,69	0,01	0,58	58,1
	CKN	0,02	1,09	72,47	0,01	0,95	95,4

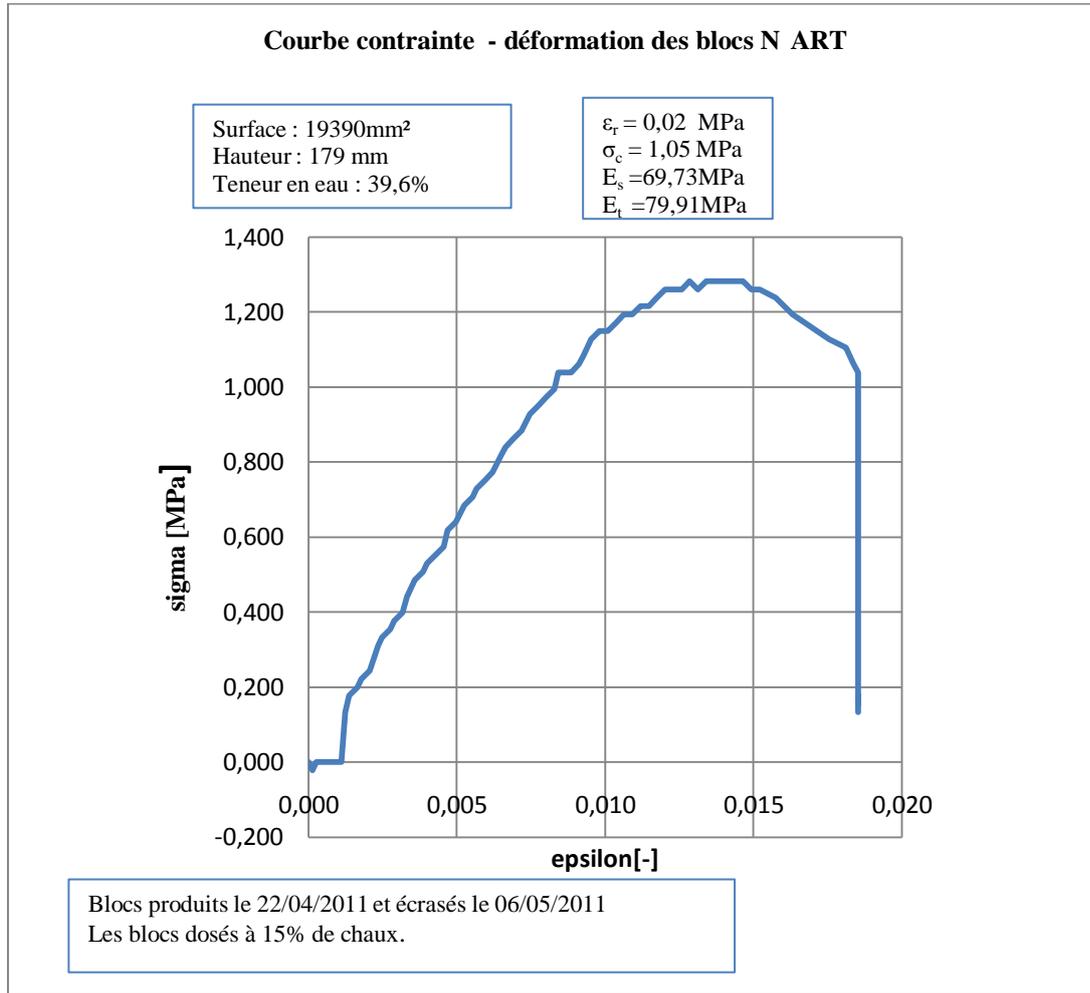
ANNEXE 9: Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 10% de chaux, écrasées à 14jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s à 14 jours

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_v [MPa]	E_t [MPa]
10	ALM	0,016	1,20	74,87	0,09	0,67	83,13
	BLM	0,012	1,22	101,25	0,01	0,99	110,44
	CLM	0,013	1,15	88,08	0,01	0,99	89,55

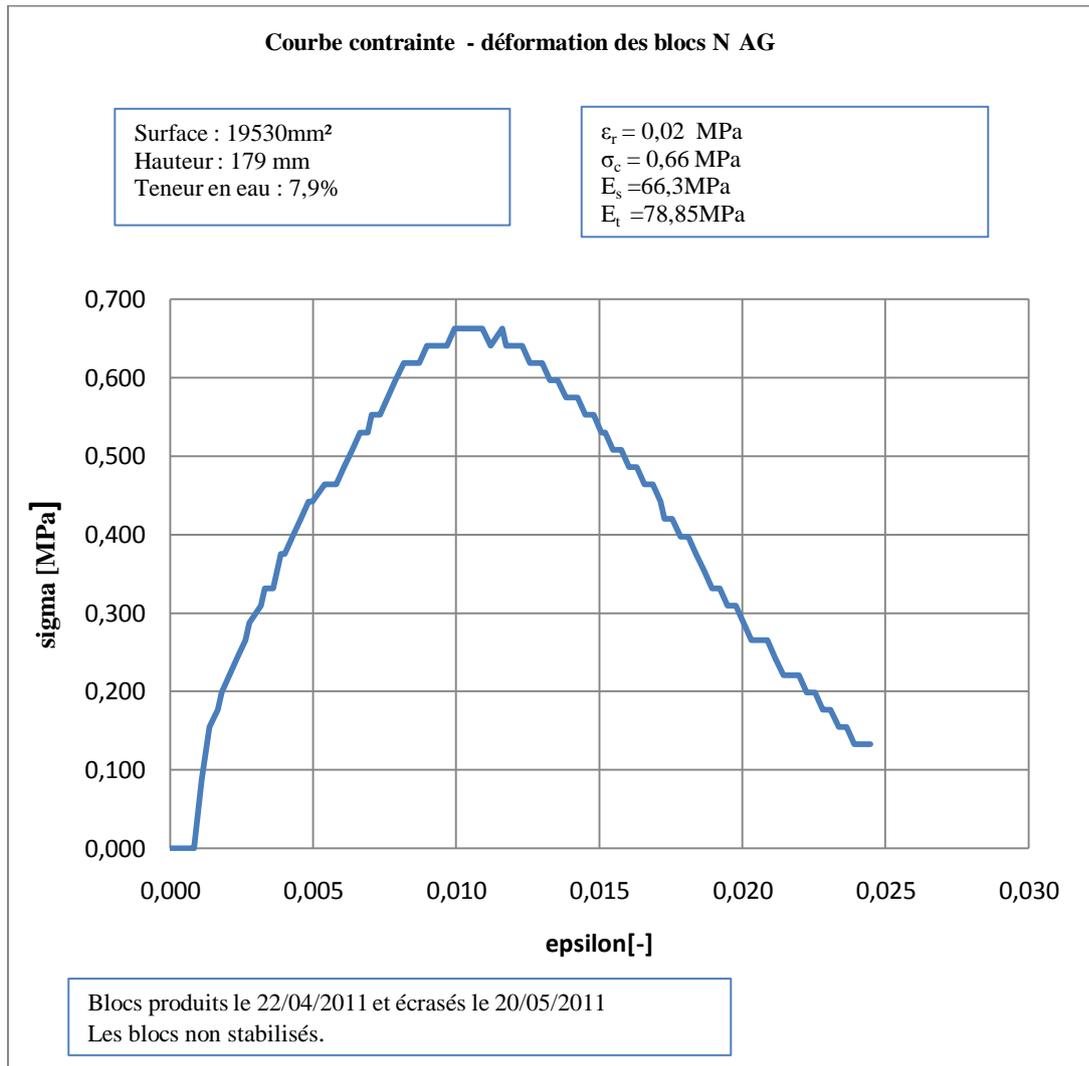
ANNEXE 10: Courbe contrainte-déformation des briques dosées à 15% de chaux et écrasées à 14jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s à 14 jours

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
15	ART	0,02	1,05	69,73	0,01	0,85	76,91
	BRT	0,01	1,28	91,57	0,09	1,04	129,87
	CRT	0,01	1,04	115,44	0,01	0,82	136,33

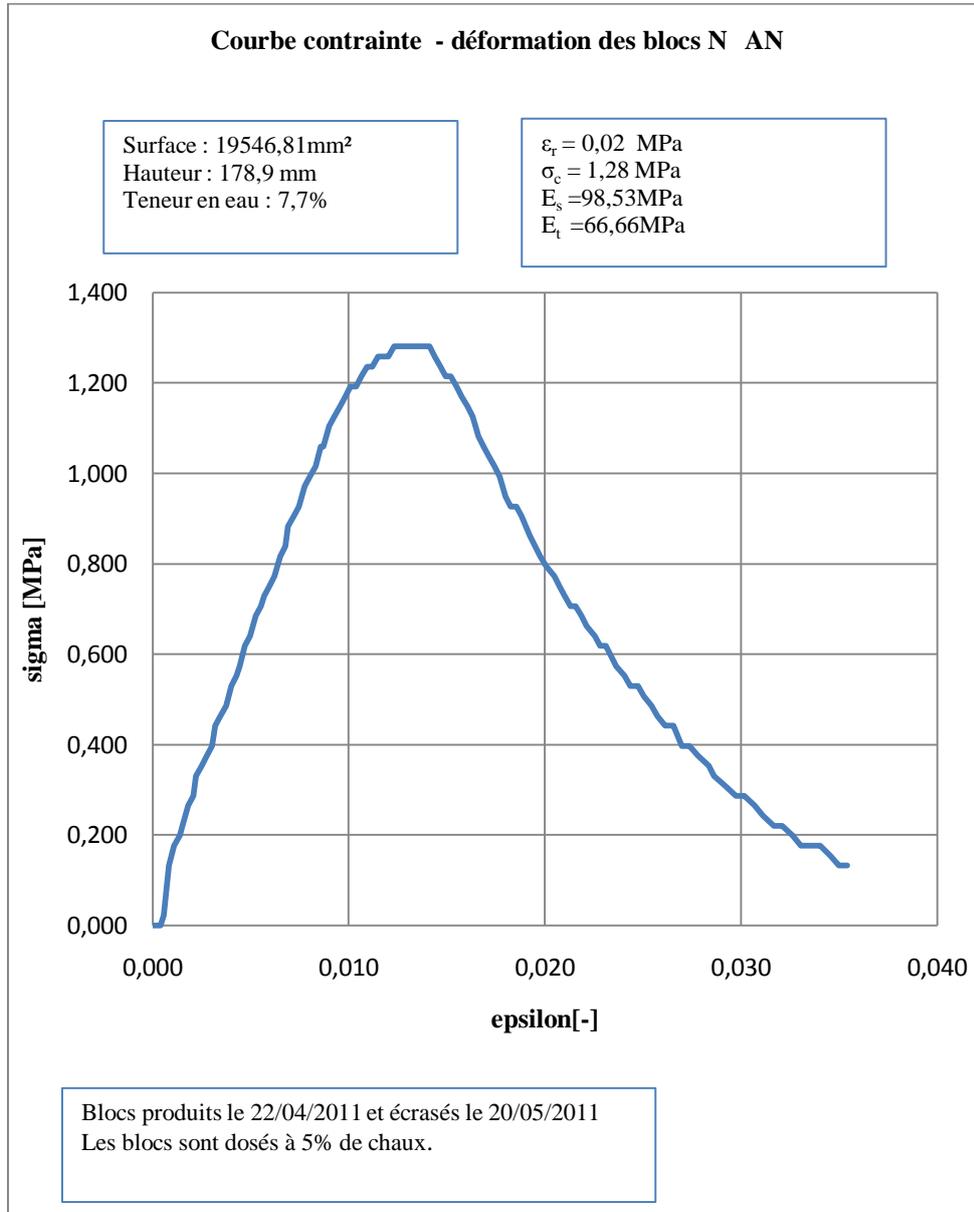
ANNEXE 11: Courbe contrainte-déformation des blocs non stabilisés, écrasé à 28jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s des blocs écrasés à 28 jours

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
0	AG	0,01	0,66	66,3	0,01	0,55	78,85
	BG	0,01	0,89	74,33	0,01	0,83	82,6
	CG	0,01	1,15	81,78	0,01	1,04	103,5

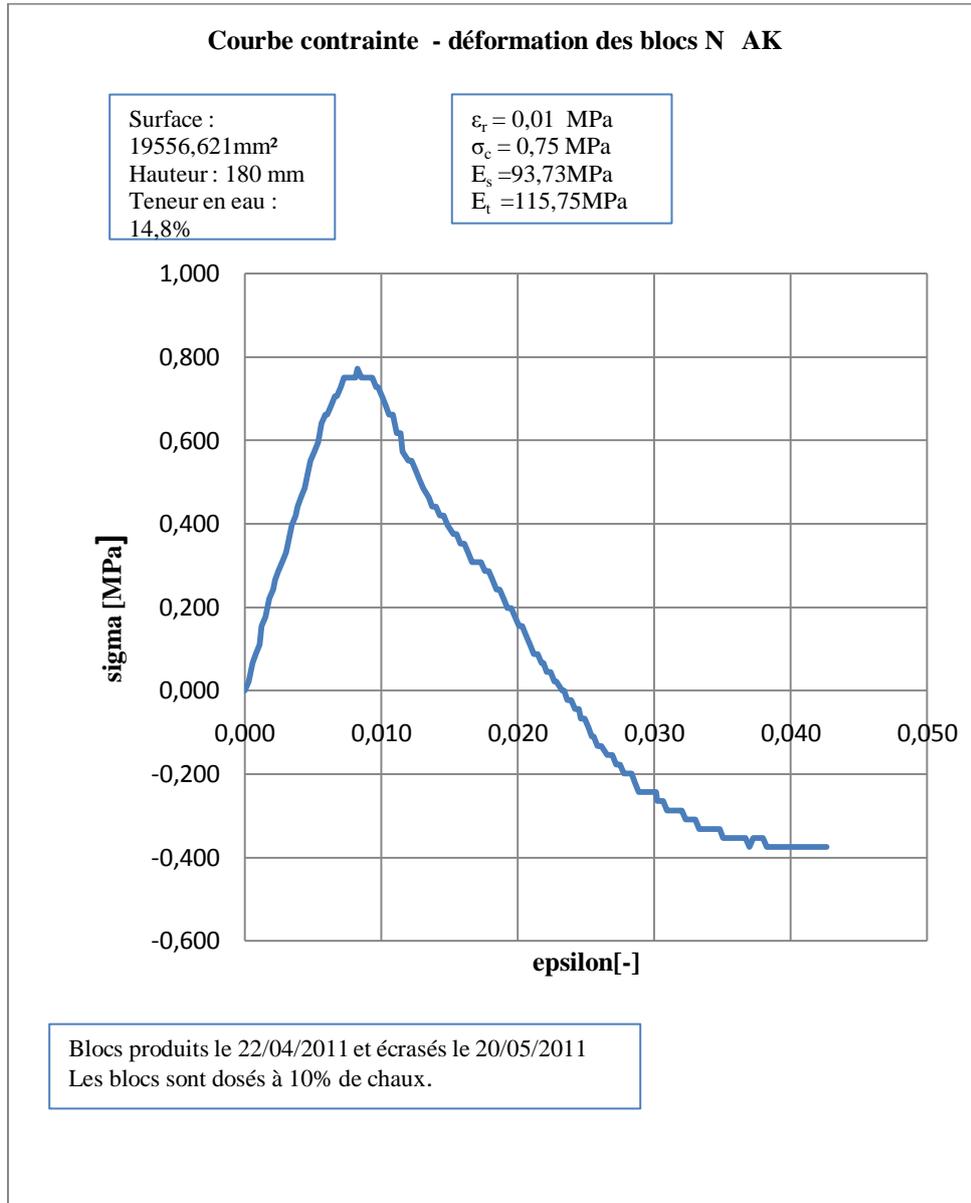
ANNEXE 12: Courbe contrainte-déformation des blocs dosés 5%, écrasés à 28jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s écrasées à 28jours

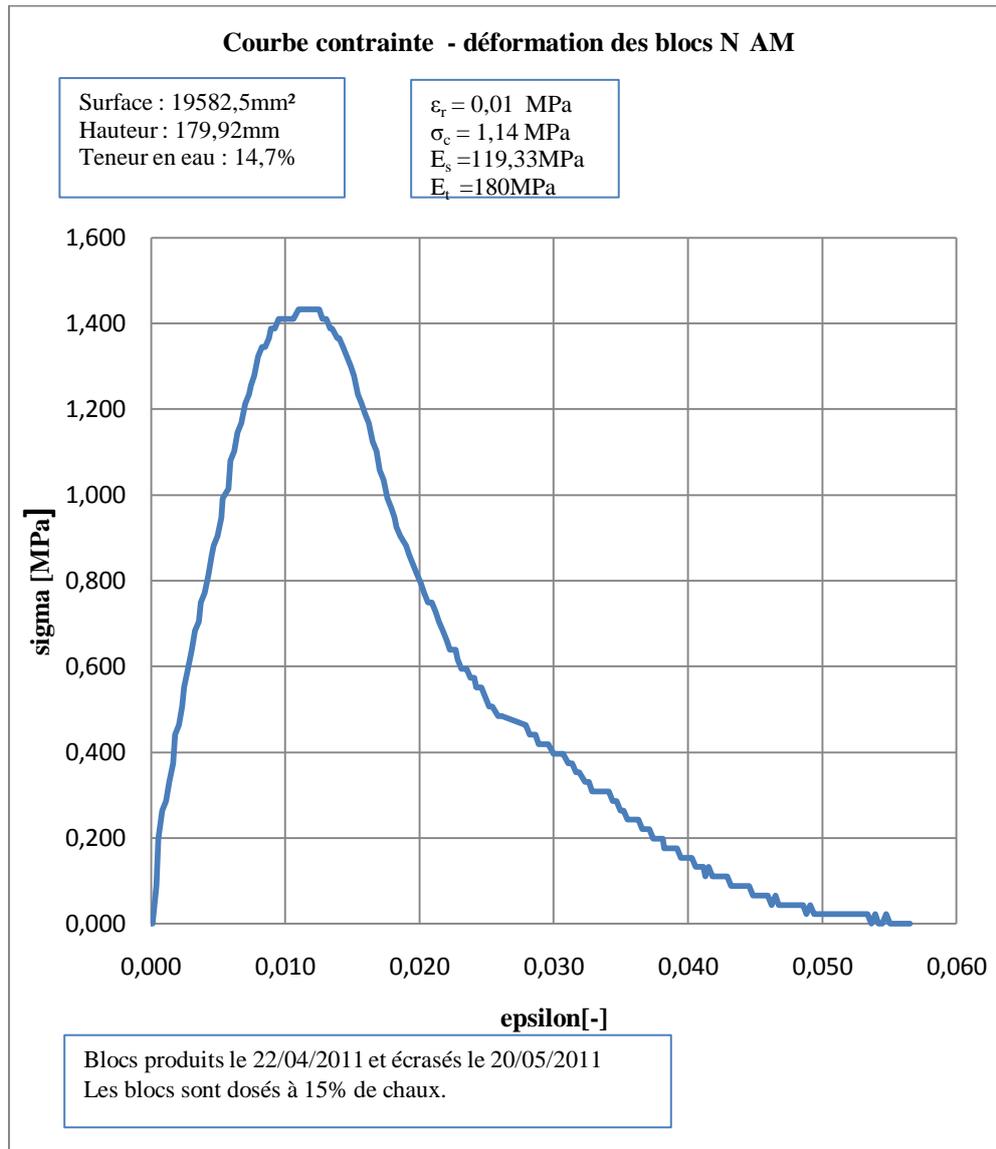
Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
5	AN	0,01	1,28	98,53	0,01	0,60	66,66
	BN	0,01	1,33	110,66	0,01	1,02	127,25
	CN	0,01	1,35	103,69	0,01	1,02	127,13

ANNEXE 13: Courbe contrainte-déformation des blocs dosés à 10% et écrasés à 28jrs



Valeurs de module de Young E_t et E_s écrasées à 28jours

Dosage(%)	N°de briques	ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
10	AK	0,01	0,75	93,73	0,00	0,46	115,75
	BK	0,01	0,97	96,9	0,01	0,77	110,14
	CK	0,01	0,93	92,7	0,01	0,77	110,43

ANNEXE 14: Courbe contrainte-déformation des blocs dosés à 15% et écrasés à 28jrs

 Valeurs de module de Young E_t et E_s écrasées à 28jours

Dosage(%)		ϵ_r	σ_c [MPa]	E_s [MPa]	ϵ_x	σ_y [MPa]	E_t [MPa]
15	AM	0,01	1,43	119,33	0,01	1,08	180
	BM	0,011	1,72	156,27	0,01	1,30	216,66
	CM	0,010	1,56	156,4	0,01	1,28	182,57