



**TENUE À HAUTE TEMPERATURE DES BLOCS EN TERRE
COMPRIMEES STABILISES AU CIMENT ET À LA CHAUX (CCR)**

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ GENIE CIVIL BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS**

Présenté et soutenu publiquement le 30 Janvier 2023 par

COULIBALY Yacouba (20150036)

Directeur de mémoire : Pr Adamah MESSAN

Maître de stage : Dr Philbert NSHIMIYIMANA, Assistant d'enseignement et de recherche, 2iE

Encadreur : Dr Seick Omar SORE, Maître Assistant (CAMES), Université Nazi Boni (UNB)

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

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de conférence (CAMES)

Membres et correcteurs : Dr Seick Omar SORE
M. Hassane SEINI MOUSSA

Promotion [2022/2023]

DEDICACES

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Je dédie ce travail à ceux à qui, quels que soient les mots utilisés, je ne pourrai jamais exprimer mon amour sincère. C'est ainsi que j'exprime ma reconnaissance

- ✚ À ma merveilleuse mère SAKILIBA Mariam, qui a enduré la souffrance sans me permettre de l'endurer, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux.
- ✚ À l'homme, mon cadeau inestimable de Dieu, qui est responsable de ma vie, de ma réussite et de tout mon respect : mon cher père COULIBALY Mamadou.
- ✚ À mon frère COULIBALY Mamadou Lamine, qui n'a cessé de me conseiller, me soutenir et m'encourager tout au long de mes études. Que Dieu lui accorde chance et bonheur.
- ✚ À ma sœur, qui sait toujours apporter bonheur et joie à toute la famille.
- ✚ À mes cousins et cousines particulièrement HAIDARA Beidy Yacouba.
- ✚ À Toute la famille COULIBALY à travers le monde.

CITATION

À chacun sa manière d'apprendre. Sa manière à lui n'est pas la mienne, et ma manière n'est pas la sienne. Mais nous sommes l'un et l'autre à la recherche de notre Légende Personnelle, et c'est pourquoi je le respecte.

L'alchimiste de **Paulo Coelho**

REMERCIEMENT

Mes sincères remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à ma formation en général.

Je tiens à remercier particulièrement :

- ✚ La Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à travers son personnel, pour leur engagement dans la réussite de notre formation.
- ✚ Mon directeur de mémoire, le responsable du LEMHaD, le Professeur Adamah MESSAN pour toute sa disponibilité et son attention à mon égard.
- ✚ Mes maitres de stage, Docteur Philbert NSHIMIYIMAYA et, Docteur Seick Omar SORE qui m'ont accueilli et suivi tout au long de mon stage.
- ✚ Tout le personnel du LEMHaD qui a participé au bon déroulement de ce stage en vue de la rédaction de mon mémoire de fin d'étude.
- ✚ Tout le corps professoral de 2iE pour la formation de qualité qu'ils nous ont donné.
- ✚ A tous mes promotionnaires pour leur soutien continue durant toute ma scolarité à 2iE.

RESUME

Ce travail traite l'influence de la température (cycle de chauffage refroidissement 300°C, 600°C, 900°C et 1200°C) sur les propriétés d'usages (physiques, mécaniques et de durabilité) des briques en terre comprimées (BTC) faites à base du matériau argileux de Kamboinsé, stabilisée au ciment et à la chaux (CCR). Les résultats ont montré que les BTCs résistent bien jusqu'à une certaine température d'exposition avant de perdre leurs performances d'usage et de durabilité. La résistance en compression a augmenté jusqu'à la température de 600°C. Il convient de noter une perte remarquable des performances des BTCs au-delà de la température d'exposition de 600°C, où on observe une fissuration et une dégradation des BTCs. La résistance en compression sèche passe de 6,60 MPa à 11,68 MPa, soit une augmentation de 77 %, pour les BTCs stabilisées au ciment et de 3,21 MPa à 5,97 MPa, soit une augmentation de 86 %, pour les BTCs stabilisées à la chaux (CCR). En condition humide, les BTCs ont montré leurs capacités à bien résister jusqu'à une température d'exposition de 600°C. La résistance en compression humide varie de 5,10 MPa à 7,87 MPa pour les BTCs stabilisées au ciment et de 2,09 MPa à 3,51 MPa pour les BTCs stabilisées à la chaux (CCR). Les BTCs stabilisées au ciment et à la chaux (CCR) résistent très bien au test à l'abrasion jusqu'à 600°C au-delà, elle devient peu sensible. Le coefficient d'abrasion passe de 13,32 à 33,19 g/cm² de Tam à 600°C et 33,19 g/cm² à 4,65 g/cm² de 600°C à 1200°C pour BTCs stabilisées au ciment et de 13,29 à 3,15 g/cm² pour une température d Tam à 1200°C pour BTCs stabilisées à la chaux (CCR). Les BTCs sont classées peu capillaires à 600°C car leur coefficient d'absorption capillaire Cb 10 min passe de 13,32 à 31,21 g/cm².min^{1/2} et de 5,52 à 37,77 g/cm².min^{1/2} respectivement pour le ciment et la chaux (CCR). Au-delà de cette température les BTCs sont très capillaires dues à la présence des fissures.

Mots clés :

- ✚ Brique en terre comprimée,
- ✚ Propriétés physicomécaniques
- ✚ Durabilité,
- ✚ Tenue à haute température.

ABSTRACT

This work deals with the influence of temperature (300°C, 600°C, 900°C and 1200°C) on the properties of use (physical, mechanical and durability) of compressed earth bricks (CEB) made from base of Kamboinsé clay material, stabilized with cement and lime. The results showed that the CEB resist well up to a certain temperature of exposure before losing their performance of use and durability. The compressive strength increased up to the temperature of 600°C. It should be noted a remarkable loss of performance of CEB beyond the exposure temperature of 600°C, where cracking and degradation of CEB are observed. The dry compressive strength increases from 6,60 MPa to 11,68 MPa, either an increase of 77%, for cement-stabilized CEB and from 3,21 MPa to 5,97 MPa, either. an increase of 86%, for lime-stabilized CEB. In wet conditions, BTCs have shown their ability to resist well up to an exposure temperature of 600°C. The wet compressive strength varies from 5,10 MPa to 7,87 MPa for cement-stabilized CEB and from 2,09 MPa to 3,51 MPa for lime-stabilized. CEB stabilized with cement and lime resist very well to the abrasion test up to 600°C beyond, it becomes insensitive. The abrasion coefficient goes from 13,32 to 33,19 g/cm² of Tam at 600°C and 33,19 g/cm² to 4,65 g/cm² from 600°C to 1200°C for cement-stabilized CEB and from 13,29 to 3,15 g/cm² for a temperature Tam at 1200° C for CEB stabilized with lime. CEB are classified as not very capillary at 600°C because their capillary absorption coefficient C_b 10 min goes from 13,32 to 31,21 g/cm².min^{1/2} and from 5,52 to 37,77 g/cm².min^{1/2} respectively for cement and lime (CCR). Beyond this temperature the BTCs are very capillary due to the presence of cracks

Key words

- ✚ Compressed earth brick,
- ✚ Physical-mechanical properties,
- ✚ Durability,
- ✚ Holding at high temperature

LISTE DES ABREVIATIONS

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

µm : Micromètre

BTC : Brique en Terre Comprimée

C_{ab} : Coefficient d'abrasion

C_a : Coefficient d'absorption

C_{b10 mn} : Coefficient d'absorption à 10 min

F : Charge de rupture en Newton

LEMHaD : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable

MPa : Mégapascal

R_c : Résistance à la compression

W_{opt} : Teneur en eau optimale

T_{am} : Température ambiante

°C : Degré celcius

CCR : Carbure de calcium résiduel

Sommaire

DEDICACES.....	i
CITATION.....	ii
REMERCIEMENT.....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTE DES ABREVIATIONS.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	13
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
1.1 Généralités sur la construction en terre.....	15
1.1.1 Bloc de terre comprimée.....	15
1.1.1.1 Définition.....	15
1.1.1.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC.....	16
1.1.1.3 Processus de production.....	17
1.1.1.4 Avantage des BTC.....	18
1.1.2 Méthodes de Stabilisation.....	19
1.1.2.1 La stabilisation mécanique.....	19
1.1.2.2 Stabilisation physique.....	20
1.1.2.3 Stabilisation chimique.....	20
1.1.2.3.1 Stabilisation ciment.....	20
1.1.2.3.2 Stabilisation à la chaux.....	20
1.2 Tenue à haute température.....	21
1.2.1 Évaporation 20°C à 150°C.....	21
1.2.2 Déshydratation 149°C à 650°C.....	21
1.2.3 Oxydation 300°C à 982°C.....	21
1.2.4 Vitrification 900°C à 1200°C.....	22
1.3 Principales propriétés des BTCs.....	22

1.3.1 Propriétés mécaniques.....	22
1.3.2 Propriétés physiques.....	23
1.3.2.1 La densité apparente.....	23
1.3.2.2 La porosité :.....	23
1.3.3 Propriétés hydriques.....	24
1.3.3.1 Absorption par capillarité et par immersion totale.....	24
1.3.4 Propriétés de durabilités	24
1.3.4.1 Érodabilité.....	24
1.3.4.2 La résistance à l'abrasion	25
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES.....	26
2.1 Matériaux	26
2.1.1 Latérite de Kamboinsé	26
2.1.2 Ciment	27
2.1.3 Chaux éteinte CCR.....	27
2.2 Protocole de synthèse des BTC stabilisées et procédé d'exposition à hautes températures des BTC.....	27
2.2.1 Protocole de synthèse des BTCs : Production et maturation.....	27
2.2.2 Exposition à hautes températures.....	28
2.2.3 Méthodes de caractérisation des propriétés d'usages des BTC	29
2.2.3.1 Propriétés physico-mécaniques.....	29
2.2.3.1.1 Densité apparente et porosités accessibles à l'eau.....	29
2.2.3.1.2 Résistance à la compression sèche et humide	30
2.2.3.2 Propriétés de durabilité.....	31
2.2.3.2.1 Résistance à l'abrasion	31
2.2.3.2.2 Résistance à l'érodabilité.....	32
2.2.3.3 Propriétés hydriques.....	33
2.2.3.3.1 Absorption par capillarité.....	33

2.2.3.3.2 Absorption par immersion totale	34
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	35
3.1 Aspects des BTCs après la tenue à haute température.....	35
3.2 Influence sur les propriétés physico-mécanique.....	36
3.2.1 Masse volumique et porosité	36
3.2.2 Résistance à la compression	38
3.3 Influence sur les indicateurs de durabilités	41
3.3.1 Absorption d'eau par capillarité	41
3.3.2 L'absorption par immersion totale.....	45
3.3.3 Résistance à l'abrasion	45
3.3.4 Résistance à l'érodabilité.....	47
CONCLUSION GENERALE.....	50

Liste des tableaux

Tableau 1: Classe de résistance en compression sèche et humide	22
Tableau 2: Classification de la profondeur d'érosion des BTC	25
Tableau 3: Classification de la résistance à l'abrasion	25
Tableau 4 : Composition chimique de la terre de Kamboinsé	27
Tableau 5: Composition minéralogique de la terre de Kamboinsé	27
Tableau 6 : Composition minéralogique de la chaux CCR	27
Tableau 7: Désignation des BTC.	29
Tableau 8: Classement des résistances à la compression sèche et humide des BTC	41
Tableau 9 Coefficient d'absorption Cb10min et leur classification BTC stabilisées au ciment et à la chaux.....	44
Tableau 10: Classement du coefficient d'abrasion des BTC XP P 13-901	47

Liste des équations

Équation 1	30
Équation 2	30
Équation 3	31
Équation 4	32
Équation 5	33
Équation 6	34
Équation 7	34

Liste des figures

Figure 1 : Fuseau granulaire des matériaux recommandés pour les BTC (H Houben 1998) ...	16
Figure 2 : Fuseau de liquidité des matériaux recommandés pour les BTC (H Houben 1998) .	17
Figure 3 : Cycle de production des BTC	18
Figure 4:Terre argileuse de Kamboinsé.....	26
Figure 5:Profil de chauffage des BTC en fonction du temps.....	29
Figure 6: Dispositif expérimental pour l'essai de compression	31
Figure 7:Dispositif expérimental pour l'essai d'abrasion.....	32
Figure 8: Dispositif expérimental pour l'essai d'érosion	33
Figure 9:BTC stabilisée au ciment après exposition à haute température.....	35
Figure 10:BTC stabilisée à la chaux après exposition à haute température	36
Figure 11 : Évolution de la densité et la porosité en fonction de la température des BTCs stabilisées au ciment	37
Figure 12 : Évolution de la densité et de la porosité en fonction de la température des BTCs stabilisées à la chaux	38
Figure 13:Résistance à la compression sèche et humide des BTC stabilisées au ciment.....	39
Figure 14:Résistance à la compression sèche et humide des BTC stabilisées à la chaux	40
Figure 15: Absorption d'eau par capillarité des BTC stabilisée au Ciment (Sorptivité de 1H à 24H).....	42
Figure 16:Absorption d'eau par capillarité des BTC stabilisée à la chaux (Sorptivité de 1H à 24H).....	42
Figure 17 : Évolution du coefficient d'absorption C_{b10min} en fonction de la température pour les BTC stabilisées au ciment	43
Figure 18: Évolution du coefficient d'absorption C_{b10min} en fonction de la température pour les BTC stabilisées à la chaux	44
Figure 19 : Immersion totale 24H des BTCs stabilisées au ciment(a) et à la chaux(b) en fonction de la température	45
Figure 20: Évolution du coefficient d'abrasion et de la perte de masse en fonction de la température des BTC stabilisées au ciment	46
Figure 21: Évolution du coefficient d'abrasion et de la perte de masse en fonction de la température des BTC stabilisées à la chaux.....	47
Figure 22 : évolution de la Profondeur d'érosion et la perte en fonction de la température des BTCs stabilisées au ciment	48

Figure 23 évolution de la Profondeur d'érosion (a) et la perte (b) en fonction de la température des BTCs stabilisées à la chaux49

INTRODUCTION GENERALE

La terre est le matériau de construction utilisé par l'homme depuis les temps anciens. Selon les statistiques ONU HABITAT établies, il y a près de quarante ans, un tiers de la population mondiale occupait des demeures conçues dans une architecture en terre et vivait sur les cinq continents en milieu urbain, comme en milieu rural. La terre est reconnue pour ses nombreux avantages sur le plan économique, environnemental et local. Elle est également recyclable et nécessite moins d'énergie pour sa mise en œuvre.

Par ailleurs, la construction en terre est considérée par certains comme non durable pour les pauvres. Elle fut remplacée par la construction en béton car le béton présente des propriétés mécaniques plus favorables que la terre. Mais, le béton lors de sa formulation nécessite une grande quantité de ciment. La production du ciment émet 10% de gaz à effet de serre sur la planète.

Cependant, compte tenu de ces nombreux avantages, de nombreux chercheurs se sont récemment intéressés à la construction en terre comme matériaux alternatifs dans le but d'apporter des connaissances scientifiques suffisantes pour la réduction de la part d'émission de gaz carbonique CO₂ dans le secteur du bâtiment. Parmi les techniques les plus utilisées dans la construction en terre crue, on trouve le pisé et, plus récemment, les Briques de Terre Comprimées (BTC). Les BTCs sont stabilisées avec des liants minéraux tels que le ciment et la chaux afin d'améliorer leurs performances mécaniques et durables. De nombreuses études antérieures ont été réalisées pour évaluer les différentes propriétés à savoir physique, hydrique, mécanique et les propriétés de durabilité à température. Cependant, peu d'études se sont intéressées à la tenue au feu (générées par un accident d'incendie) des BTCs stabilisées aux liants minéraux tels que le ciment et la chaux.

Il est donc important d'évaluer leurs résistances lorsqu'elles sont soumises à ce type d'agressions. C'est dans cette optique que la présente étude a pour objectif d'apprécier l'influence de la température sur les propriétés d'usage des BTCs stabilisées aux liants minéraux industriels (ciment et chaux CCR).

De façon spécifique l'étude vise à :

- Évaluer l'influence de la température sur les propriétés physicomécaniques des BTC stabilisées au ciment et à la chaux

- Évaluer l'influence de la température sur les propriétés de durabilité des BTC stabilisés au ciment et à la chaux.
- Évaluer l'influence de la température sur les performances hydriques des BTC stabilisés au ciment et à la chaux.

Ce travail est essentiellement composé de trois chapitres que sont :

- Chapitre 1 : Synthèse bibliographique
- Chapitre 2 : Matériaux et méthodes expérimentales utilisés pour aboutir aux objectifs.
- Chapitre 3 : Résultats et discussion

CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le présent chapitre, nous présenterons la synthèse bibliographique sur les trois principaux thèmes abordés dans ce mémoire, à savoir la brique de terre comprimée (BTC), les méthodes de stabilisation, les principales propriétés d'usages des BTC et la tenue à haute température des briques de terre comprimée. L'objectif de ce chapitre est de comprendre, dans un premier temps les matériaux entrant en compte dans le processus de fabrication des BTC ainsi que les méthodes de stabilisation. Il est aussi, dans un second temps, de faire une description des différents phénomènes thermo-chimique lors du chauffage. Enfin, ce chapitre nous permettra de mieux comprendre les méthodes d'évaluation des propriétés des BTC avant et après exposition à haute température.

Pour mener à bien notre étude, nous avons consulté un grand nombre d'articles scientifiques, de manuscrits de thèse et de documents de références sur les briques de terre comprimée (BTC), et l'effet de la température sur les indicateurs de durabilités. Ces recherches nous ont permis de faire un recueil de données et d'informations importantes sur les travaux menés par d'autres équipes de chercheurs et scientifiques à travers le monde.

1.1 Généralités sur la construction en terre

Depuis des temps anciens, l'homme utilise la terre comme matériau de construction grâce à des connaissances qui ne sont qu'empiriques. Il existe plusieurs techniques de construction en terre : le pisé, la bauge, l'adobe, le torchis, le bousillage, la brique de terre comprimée, le torchis, la terre-paille, la terre, les copeaux bois. Dans le cadre de notre étude nous avons utilisés la technique la plus récente qui est la construction en brique de terre comprimée[1].

1.1.1 Bloc de terre comprimée

Brique de terre comprimée, plus communément appelée BTC, représente une des techniques de construction en terre comptant parmi les plus récentes. En effet, elle n'est apparue que dans les années 50, lors d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. La première presse manuelle de l'ingénieur Raul Ramirez, et ses 300 à 800 briques quotidiennes, a conquis le marché international par sa simplicité et sa légèreté. Après plusieurs améliorations, cette technique a pris son essor dans le cadre de programmes d'habitat économique en Afrique et Amérique Latine.

1.1.1.1 Définition

Les BTC sont des éléments de maçonnerie, de dimensions réduites et de caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide

suivie d'un démoulage immédiat. Les BTCs sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre ; un additif peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTCs dépendent de la qualité des matières premières (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) »

1.1.1.2 Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC

Pour la bonne qualité des BTCs, il convient de choisir une terre répondant à certaines normes strictes notamment celles définies par le CRATerre. Concernant la granularité des latérites utilisés dans la fabrication des BTCs, la norme recommande des terres dont la texture s'inscrit dans le fuseau du diagramme des textures présent dans la figure 1 et 2 ci-dessous.

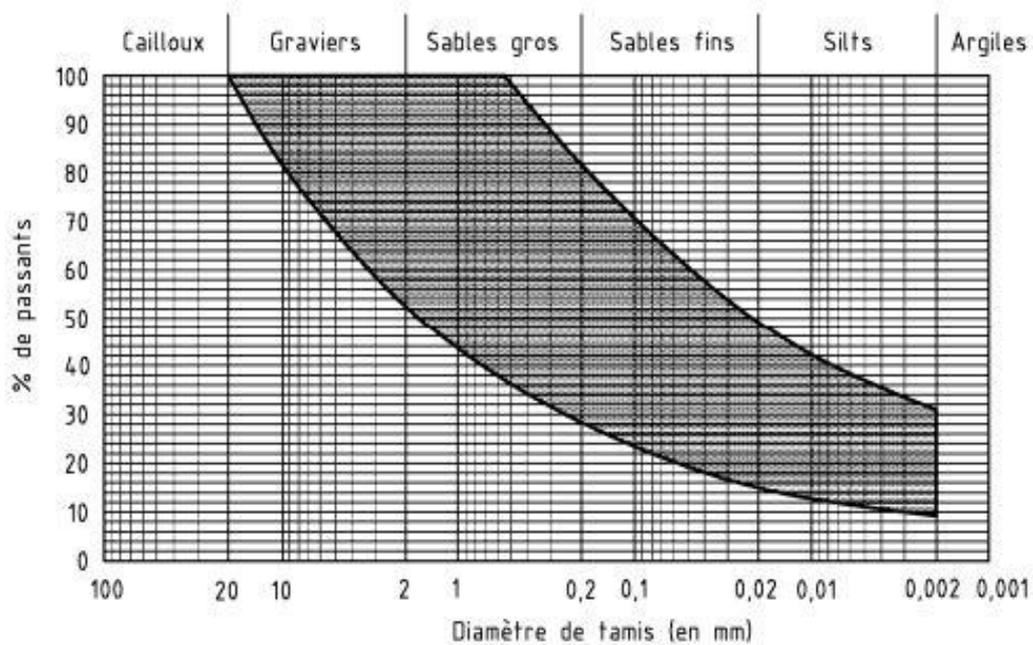


Figure 1 : Fuseau granulaire des matériaux recommandés pour les BTC (H Houben 1998)

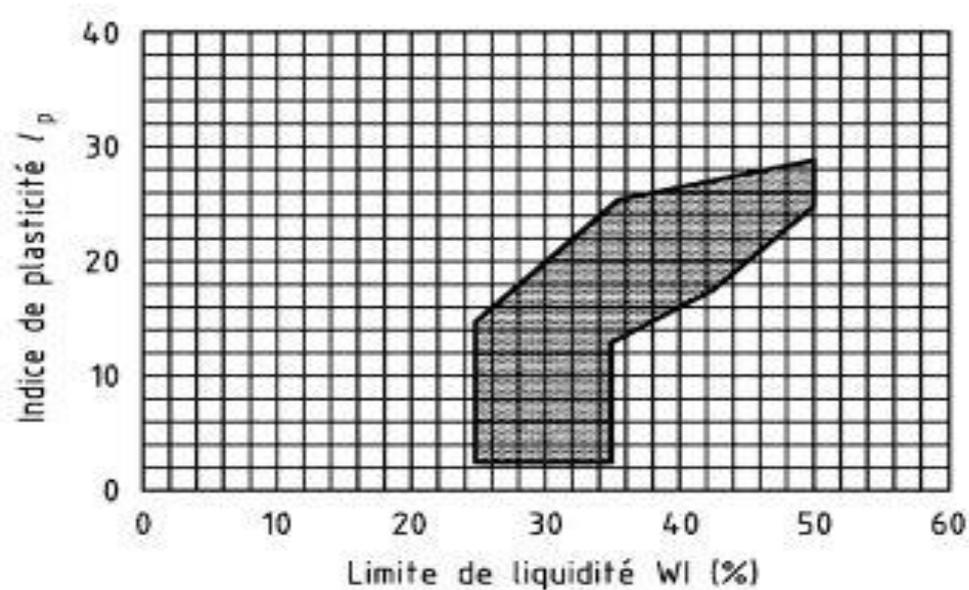


Figure 2 : Fuseau de liquidité des matériaux recommandés pour les BTC (H Houben 1998)

La latérite ne doit pas être trop argileuse au risque d'entraîner du retrait et des fissurations fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} \leq 30\%$). Les gros éléments du matériau ne doivent pas dépasser une taille limite qui dépend de la taille des blocs, une moyenne de 5 mm est prescrite. En ce qui concerne la plasticité, le matériau de base doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ($\% 2\mu\text{m} \geq 5\%$).

1.1.1.3 Processus de production

Les BTC sont produites selon le cycle produit dans la figure. Cette production commence par l'extraction qui consiste à extraire à l'aide de la pioche, la pelle ... de la terre dans une carrière bien définie, le transport qui consiste à acheminer la terre extraite vers l'unité de production à l'aide des engins de transport (camion benne,...) ensuite le tamisage du matériau qui sert à éliminer les granulats indésirables et à rendre la terre pulvérulente, afin d'obtenir un mélange équilibré, après le tamisage vient le malaxage puis la compression du matériau dans une presse afin d'obtenir un matériau bien calibré, enfin la cure des BTC qui consiste au stockage et au séchage pour une période de 28 à 45 jours pour le ciment et la chaux.[2]

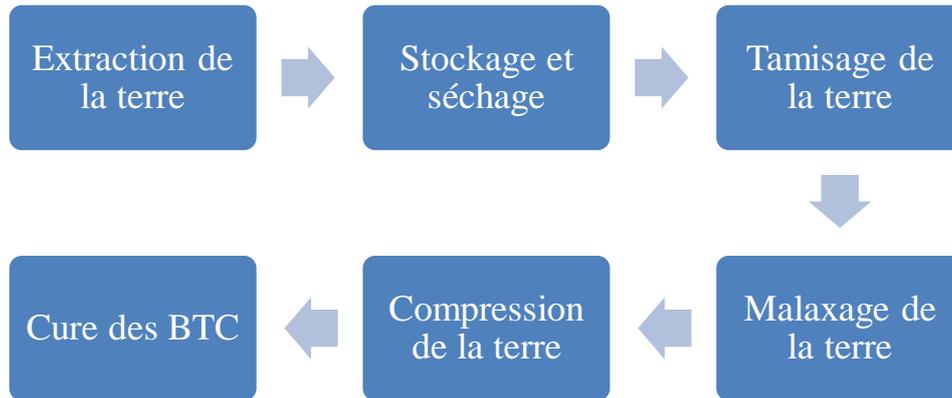


Figure 3 : Cycle de production des BTC

1.1.1.4 Avantage des BTC

La BTC présente plusieurs avantages. Ces avantages sont entre autres :

- **Matériau circulaire**

Une BTC peut être réutilisée ou recyclée sans grand apport d'énergie. Son temps de vie est infini car une fois démoulé, elle peut être broyée et refaçonée en nouvelle brique.

- **Confort et bien être**

La BTC n'est pas toxique, n'émet pas de CO₂ et régule naturellement l'humidité et la température de l'air de de par ses qualités hygrothermiques et thermiques. Aussi, due à sa perméabilité à la vapeur d'eau, elle permet la migration du surplus d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur.

- **Ressource abondante**

La terre est présente partout en abondance. De plus, utiliser des terres excavées lors de chantiers comme une ressource évite l'épuisement des carrières. Ces terres de déblai permettent de valoriser les déchets en matériau de construction.

- **Faible bilan carbone**

Une BTC est principalement constituée de terre crue qui est une ressource locale qui demande peu ou pas de transport, de cuisson ou de transformation. Ce matériau présente donc un très faible impact environnemental.

- **Esthétique**

En cloison, en mur porteur, la BTC offre une richesse de formes, de motifs et de couleur variées dans son utilisation. L'aspect naturel de la terre apporte une sensation de familiarité et de douceur visuelle.

1.1.2 Méthodes de Stabilisation

La stabilisation est un procédé qui peut être défini comme une méthode physico chimique permettant à un sol, à une terre, de mieux satisfaire aux exigences qu'impose son utilisation. Lorsque l'on décide de stabiliser la terre c'est-à-dire modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière, il faut étudier :

- Les propriétés de la terre à traiter
- Les améliorations souhaitées
- Les produits, matériaux ou procédés utilisables
- Les exigences de réalisation de l'ouvrage telles que couts et délais
- Les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet

La stabilisation, quel que soit l'application répond à un nombre réduit d'objectif qui sont : la réduction du volume des vides entre les particules solides (porosité), le colmatage des vides que l'on peut supprimer (perméabilité), la création des liens ou amélioration des liaisons existantes entre particules (résistance mécanique). Ces objectifs peuvent être selon trois procédés différents :

1.1.2.1 La stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique appelée compression par densification agit sur la porosité du matériau en répartissant uniformes les pores du sol et en modifiant leur taille pour rendre le matériau plus compact et résistant à la compression. Quatre techniques de compressions ont été identifiées : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. Chacune à sa propre teneur en eau, qui correspond à une masse idéale de volume sec et dense. Pour atteindre le plus niveau de compatibilité, un certain nombre de facteurs sont pris en considération. Par exemple, il est important de mettre en œuvre une énergie de compactage adaptée à la nature du sol. Ainsi, l'énergie nécessaire au compactage augmentera au fur et à mesure que la Teneur en eau diminuera, ce qui entrainera une augmentation de la masse volumique sèche, mais une quantité excessive d'énergie provoquera la déformation des blocs. Pour atteindre un compactage maximum, une granulométrie étalée est nécessaire contrairement à une granulométrie serrée. Si

les conditions sont réunies pour compacter, il en résultera une moindre perméabilité, une compressibilité réduite, une moindre absorption d'eau. Que ce soit initialement ou avec le temps, les résistances mécaniques augmenteront dans la mesure du possible.[3]

1.1.2.2 Stabilisation physique

La terre disponible peut parfois présenter des caractéristiques susceptibles d'amélioration au moyen d'apport ou de coupures granulaires, c'est ainsi que l'on peut corriger une teneur trop forte ou trop faible fines ou en gravillon. Un matériau trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant un matériau trop peu plastique le sera par apport de fines.

1.1.2.3 Stabilisation chimique

1.1.2.3.1 Stabilisation ciment

Mélangé à la terre, le ciment hydraté réagit de deux manières. La première est une auto-réaction qui donne naissance à un mortier de ciment pur hydraté et à une réaction avec le squelette sableux. La deuxième est une réaction en trois étapes avec l'argile. Ces phases sont les suivantes : premièrement, des gels de ciment sont formés à la surface des argiles suite à l'hydratation du ciment qui libère de la chaux. Celle-ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en détérioration. La deuxième phase, est celle de la dissociation des agrégats d'argile suite à l'évolution de l'hydratations. Les gels de ciment formés précédente peuvent alors peuvent à l'intérieur des argiles. La troisième phase est consacrée à l'interprétation des gels de ciments et des agglomérats argileux. Cet enchevêtrement des structures donne naissance à trois matrices entrelacées : « une matrice inerte sableuse liée au ciment ; une matrice d'argile stabilisée ; une matrice de terre non stabilisée » [4]

Les effets de la stabilisation du ciment sont nombreux. Elle modifie la masse volumique sèche du sol (diminution pour un sol se compactant bien et augmentation pour un sol se compactant faiblement), augmente la résistance à la compression en condition humide et sèche et augmente également la résistance à l'érosion. Pour la majorité des terres, un dosage de 6% à 12% est conseillé pour assurer une stabilisation efficace et des résultats satisfaisants.

1.1.2.3.2 Stabilisation à la chaux

La stabilisation de la chaux peut se décomposer en cinq mécanismes. Le premier est l'absorption d'eau de la terre humide par la chaux. Cette hydratation est accompagnée par un important dégagement de chaleur. Le second est l'échange cationique des ions de calcium de la terre humide : ceux-ci se substituent aux cations échangeables de la terre. Le troisième est la floculation et l'agglomération des particules de terre suite au nombre plus important

d'électrolytes dans l'eau interstitielle dû à l'échange de cations précédant, ce qui entraîne un changement de texture et de structure. Le quatrième mécanisme est la carbonatation : « la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres ». Le dernier mécanisme est la réaction pouzzolanique. Celle-ci est très importante car c'est elle qui influence le plus les performances de la stabilisation à la chaux. Cette dernière, produit en effet un environnement alcalin au pH élevé dans lequel se dissolvent les minéraux argileux. La silice et l'alumine des argiles se recombinaient alors avec le calcium formant des silicates d'aluminium et calcium qui vont cimenter les grains entre eux. [4]

La stabilisation à la chaux influence la masse volumique sèche de la terre. Elle permet également d'augmenter la résistance à la compression. L'ajout de la chaux au sol peut influencer sur la variation dimensionnelle : un ajout de 1% à 2% peut réduire un retrait de 10% à 1% et éliminer complètement le gonflement.

1.2 Tenue à haute température

Les différents processus lors du chauffage des briques en terre sont :

1.2.1 Évaporation 20°C à 150°C

L'évaporation de l'eau libre ou mécanique a lieu lors d'une étape d'évaporation. L'eau mécanique est l'eau ajoutée au mélange d'argile pendant le traitement. En raison de la perte mécanique d'eau à ce stade, on observe une réaction endothermique.[5]

1.2.2 Déshydratation 149°C à 650°C

La combustion et la décomposition des matières carbonées et des carbonates, ainsi que l'eau combinée, se produisent pendant la phase de déshydratation. La combustion complète de l'eau combinée, les matières carbonées et les carbonates dépend de la vitesse de chauffage. Un chauffage rapide peut entraîner la persistance d'une atmosphère de vapeur à l'extérieur et à l'intérieur des briques, provoquant des circonstances restrictives (causées par des niveaux insuffisants d'oxygène à l'intérieur des briques) qui peuvent entraîner une décoloration. En raison de la libération de dioxyde de carbone et d'eau, une réaction endothermique est observée à ce stade.[6]

1.2.3 Oxydation 300°C à 982°C

L'oxydation dans le four peut commencer à des températures aussi basses que 300°C et peut s'étendre jusqu'à plus de 900°C, fonction de la vitesse de chauffage. Afin de produire des briques de qualité, il est essentiel que toute matière carbonée résiduelle soit brûlée et tous les résidus de fer oxydés en ses oxydes à ce stade. Une réaction exothermique est observée à ce

stade, et est due à l'oxydation des composés organiques et par la suite, composés de sulfure dans le matériau argileux. Cette réaction exothermique est observée à partir de 300°C jusqu'à 450°C, puis une réaction endothermique s'installe. Ceci est attribué à la perte d'eau de la structure cristalline du minéral et à un changement en phase cristalline du quartz de la forme α à β . La perte d'eau est obtenue sans dommage ni rétrécissement de la structure en treillis minéral argileux.[6]

1.2.4 Vitrification 900°C à 1200°C

Lorsque toute la matière carbonée a été complètement oxydée, la vitrification commence généralement à environ 900°C et se poursuit jusqu'à la température la plus élevée que les briques peuvent supporter sans subir de dommages. Pendant la vitrification, qui implique la fusion de la masse argileuse et le frittage des particules argileuses, la résistance des briques en terre augmente. Les particules solides sont récupérées dans le liquide qui, en refroidissant, prend surtout la forme de verre et lie les particules entre elles. La résistance des briques cuites dépend donc de la température maximale atteinte, la durée de l'étape de vitrification, ainsi que la quantité des éléments, tels que la potasse, la soude, la magnésie, la chaux et l'oxyde ferreux présents dans l'argile. À ce stade, une série de réaction exothermique est observées, du fait de l'oxydation lente des composés soufrés et éventuellement des matières organiques résiduelles, ainsi que formation de nouvelles phases cristallines.[5]

1.3 Principales propriétés des BTCs

1.3.1 Propriétés mécaniques

La première chose qui vient à l'esprit lorsqu'on parle de brique de terre comprimée est son comportement sous une charge de compression. En fait, la terre par elle-même, malgré la stabilisation mécanique qui lui a été appliquée, a très peu de résistance à la compression, à l'état sec comme à l'état humide. Trois groupes sont établis par la norme AFNOR XP P13-901 pour la classification des briques en terre comprimée[7]. Les tableaux ci-dessous illustrent ces classifications :

Tableau 1: Classe de résistance en compression sèche et humide

Blocs pleins	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Résistance sèche minimale (R) pour le fractile 0,05 - MPa	2	4	6
Résistance humide minimale (R) pour fractile 0,05 - MPa	1	2	3

Différentes valeurs ont été atteintes dans la littérature, en fonction du type de stabilisation utilisé, de la nature de la terre, ainsi que le traitement post fabrication appliquée aux briques. [8] a obtenu des valeurs de compression sèche pour les BTCs stabilisées à 10% de CCR et 8% de ciment allant de 2,62 MPa à 3,40 MPa et 5,80 MPa respectivement. Ils ont atteint une valeur de 2,48 MPa pour les briques stabilisées au ciment lors de la compression humide, et des résistances d'ordre 1.5 MPa pour les briques stabilisées au CCR. Bakam V et al (2022) ont obtenu une valeur de 2,37 N/mm² et 1,21 N/mm² en compression sèche après exposition à haute température respective 800°C et 200°C. Une autre caractéristique importante de la brique est sa résistance en flexion et à la traction.

1.3.2 Propriétés physiques

1.3.2.1 La densité apparente

La densité apparente est un attribut physique qui quantifie la masse d'un matériau par unité de volume. Cette caractéristique physique des échantillons est déterminée conformément à la norme française [9] . Elle varie en sens avec la résistance mécanique, mais dans le cas des briques stabilisées à la CCR, les résistances mécaniques et les densités évoluent en sens inverse. [4] a obtenu également avec les mêmes briques une faible résistance (1,2 MPa) mais une valeur de densité élevée (1672 kg/m³) avec 0% de CCR et une valeur de résistance élevée de (4,60 MPa) et une faible densité (1558 kg/m³). Par ailleurs, une étude récente a révélé que la densité apparente des géopolymères fins diminue avec l'augmentation de la température.

1.3.2.2 La porosité :

La porosité d'un matériau granulaire comme la brique est le facteur clé qui réagit sur son comportement et ses capacités. Par rapport à un matériau avec moins de pore, un matériau avec plus de pore présente une densité plus une densité plus faible. De plus, ses performances mécaniques seront initialement inférieures à celle du second. Il est donc nécessaire de comprendre la nature et la répartition des pores dans le matériau afin de déterminer avec précision ses propriétés. Le terme porosité désigne l'ensemble des espaces pouvant contenir un fluide et présents dans un matériau (gaz ou liquide). Leur origine et leurs proportions dépendent des circonstances de production, de maturation et stockage.

Ainsi, de manière très générale, on peut dire qu'il existe deux grandes familles de porosité : la porosité primaire, il se rapporte aux pores, et la porosité secondaire, qui se rapporte aux fissures. Les deux classifications les plus courantes pour les pores sont :

- Du point de vue de l'ouverture des pores, selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UICPA), on peut distinguer :
 - Les micropores lorsque leurs diamètres sont inférieurs à 2 nm,
 - Les méso pores pour ceux dont la taille varie de 2 à 50 nm
 - Les macropores pour ceux dont les diamètres sont supérieurs à 50 nm.
- Du point de vue de l'accessibilité de l'eau, on constate :
 - Les macro-pores pour les pores il seaturent en eau dans la première heure de contact entre le matériaux et l'eau,
 - Les pores qui prennent le relai après sont ceux qui sont accessibles à l'eau.
 - Les pores fermés, ceux qui sont isolés des autres et ne reçoivent aucune goutte d'eau.

1.3.3 Propriétés hydriques

1.3.3.1 Absorption par capillarité et par immersion totale

Les infiltrations capillaires d'eau dans un ouvrage, notamment en terre, sont souvent préjudiciables à la structure. C'est pourquoi, afin de savoir comment conserver cette propriété des briques, il est nécessaire de l'étudier en profondeur. Lorsque seule la face de pose de la brique est en contact avec l'eau, le processus est appelé absorption capillaire. Ce phénomène est principalement dû à la porosité du matériau et à la pression interne qui s'infiltré dans ses pores.

Contrairement à l'absorption capillaire, la capacité d'une brique à retenir l'eau lorsqu'elle est complètement immergée est appelée absorption totale. Ce phénomène est également attribué aux pores. Une étude récente a révélé que la porosité et l'absorption d'eau des géopolymères minces diminue lorsque la température atteint 600°C

1.3.4 Propriétés de durabilités

1.3.4.1 Érodabilité

L'érodabilité consiste à pulvériser en continu un jet d'eau sur la surface des BTC pendant une certaine période. Cette méthode de pulvérisation a été considérée comme la meilleure représentation du vieillissement naturel.

Classification en fonction de la profondeur d'érosion[10]

Tableau 2: Classification de la profondeur d'érosion des BTC

Profondeur D'érosion PrfE(mm/h)	Indice d'érosion
$0 \leq \text{PrfE} \leq 20$	1
$20 \leq \text{PrfE} \leq 50$	2
$50 \leq \text{PrfE} \leq 90$	3
$90 \leq \text{PrfE} \leq 120$	4
$120 \leq \text{PrfE}$	5 à rejeter

1.3.4.2 La résistance à l'abrasion

L'abrasion consiste à gratter à l'aide d'une brosse métallique la surface des blocs une fois par seconde sans appliquer de force verticale, il est considéré comme trop sévère pour évaluer la durabilité des briques. Le tableau ci-dessous illustre les différentes classes de résistance à l'abrasion.

Tableau 3: Classification de la résistance à l'abrasion

Blocs pleins	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Coefficient d'abrasion (Ca) (Cm^2/g)	2	5	7

CHAPITRE 2: MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Ce chapitre sera consacré à la présentation des matériaux de base et leurs caractéristiques. La procédure de stabilisation et de production des BTCs ainsi que le procédé de traitement thermique de ces matériaux feront également l'objet dans ce chapitre. Enfin, les différentes méthodes de caractérisation physico-mécaniques et de durabilité avant et après la tenue à haute températures seront résumés dans ce chapitre

2.1 Matériaux

Les matériaux de base utilisés dans cette étude sont essentiellement une terre argileuse communément appelée latérite comme matrice principale des BTCs, le ciment Portland (liant industriel), la chaux éteinte (liant) et l'eau.

2.1.1 Latérite de Kamboinsé

La terre latéritique utilisée pour la production des BTCs est échantillonnée à la carrière de Kamboinsé située à 15km au Nord de Ouagadougou (N 12°29.399', W 001°32.981', alt. 322 m). La carrière a une superficie moyenne de 140000 m² et une épaisseur moyenne de couche exploitable de 6 m [11]. Le matériau argileux de Kamboinsé a une couleur rougeâtre avec quelques irrégularité blanchâtre figure 3.



Figure 4: Terre argileuse de Kamboinsé

Cette latérite avait été caractérisée par NSHIMIYIMANA et al (2019) qui ont montré l'aptitude de cet échantillon à être utilisée pour la production des BTC sous les recommandations de la norme XP P 13-901[7]. Le tableau 4 et 5 ci-dessous présentent les différentes caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de cet échantillon

Tableau 4 : Composition chimique de la terre de Kamboinsé

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
Poids (%)	51	24.00	12.70	0,20	0.90	0,10	0,10	0,30	0,1	10.1

Tableau 5: Composition minéralogique de la terre de Kamboinsé

Minéraux	Argile	Quartz	Goethit	Hématite	K-feldspath	Portlandite	Mica	Rutile
Poids (%)	63.1	16.8	18.4	5	0	0	0	0

2.1.2 Ciment

Le ciment utilisé dans la production de notre BTC est de classe CEM II/A-P/42.5 N, qui provient de la cimenterie Diamond Cement. Il présente une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa.

2.1.3 Chaux éteinte CCR

La chaux utilisée dans cette étude comme stabilisant est un sous-produit industriel résultant de la fabrication de gaz acétylène par la société BIG (Burkina Industrial gaz) située précisément dans la zone industrielle de Kossodo (N12°25.935', W001°29.374', alt. 301 m). Elle a également été utilisée par NSHIMIYIMANA et al (2019) et le tableau ci-dessous résume ses propriétés physiques et chimiques. Elle est utilisée sous sa forme éteinte avec une granulométrie moyenne 400 µm.

Tableau 6 : Composition minéralogique de la chaux CCR

Minéraux	Portlandite	Aragonite	Calcite	Rapiderekite	Kaolinite	Quartz	Gypse
Poids (%)	43.03	20.66	15.87	13.31	4.05	2.59	0.5

2.2 Protocole de synthèse des BTC stabilisées et procédé d'exposition à hautes températures des BTC

2.2.1 Protocole de synthèse des BTCs : Production et maturation

Dans le but d'atteindre notre objectif qui est d'évaluer l'influence de la température sur les propriétés d'usages des BTC stabilisées au ciment et à la chaux. À cet effet, nous avons réalisé deux types de formulations notamment une stabilisation 8% de ciment et celle à 10% à la chaux éteinte. Le protocole se présente comme suit :

Le malaxage est la première étape de la production, il consiste à homogénéiser à l'aide de la main les composants du mélange pour avoir un échantillon homogène. Le mélange se fait à sec dans un premier temps avec la latérite et le liant et humide dans un second temps après ajout de l'eau d'humidification. Après le malaxage nous avons couvert le récipient de malaxage pour conserver la teneur en eau.

Le matériau humide est ensuite introduit dans un moule prismatique $29.5 \times 14 \times 9.5 \text{ cm}^3$. À l'aide d'une presse manuelle de type TERSTARAM, on exerce une pression avec les doigts sur les angles du bac doseur pour les renforcer puis on compacte le mélange. On procède ensuite au démoulage. L'intérieur du moule est régulièrement lubrifié à l'huile à moteur, lui conférant ainsi une surface lisse et des arêtes vives facilitant le glissement de la pâte de terre compressée à l'intérieur de celui-ci.

Les BTCs ainsi produites sont stockées minutieusement et étiquetées. Les briques contenant le ciment et la chaux sont conservées dans les sachets plastiques qui permettront de conserver l'humidité afin de permettre une bonne réaction pouzzolanique entre la terre et le liant (ciment ou chaux). Dans notre cas, le temps de maturation est de 28 jours pour la stabilisation au ciment et 45 jours pour celle avec la chaux. Après les différentes cures humides respectives, les BTC ont toutes été séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante avant d'être soumises soit aux diverses caractérisations ou aux différentes températures.

2.2.2 Exposition à hautes températures

Les BTC durcis à 28 et 45 jours ont été exposés à des températures élevées dans un four chambre LH 30/14 à une vitesse de chauffage de $5^\circ/\text{min}$ et un temps de stabilisation de 2 heures. Pour mener à bien notre simulation et commencer à la température à laquelle les études antérieures se sont arrêtés, nous avons choisi une température de chauffage allant de 300°C à 1200°C avec un pas de 300°C afin de Les BTC ont été chauffées à 300°C , 600°C , 900°C , 1200°C . La **figure 5** présente le profil de chauffage composé de trois phases : Une phase de montée (60 min pour 300°C , 120 min pour 600°C , 180 min pour 900°C et 240 min pour 1200°C) puis une phase de stabilisation pendant 120 min pour toutes les températures et une phase de refroidissement. Le tableau 7 présente les désignations des différentes BTCs en fonction du type de stabilisation et la plage de température d'exposition de ces matériaux.

Tableau 7: Désignation des BTC.

Désignation	Ciment%	Désignation	Chaux%
KCEM8_Tam	8	KCCR10_Tam	10
KCEM8_300	8	KCCR10_300	10
KCEM8_600	8	KCCR10_600	10
KCEM8_900	8	KCCR10_900	10
KCEM8_1200	8	KCCR10_1200	10

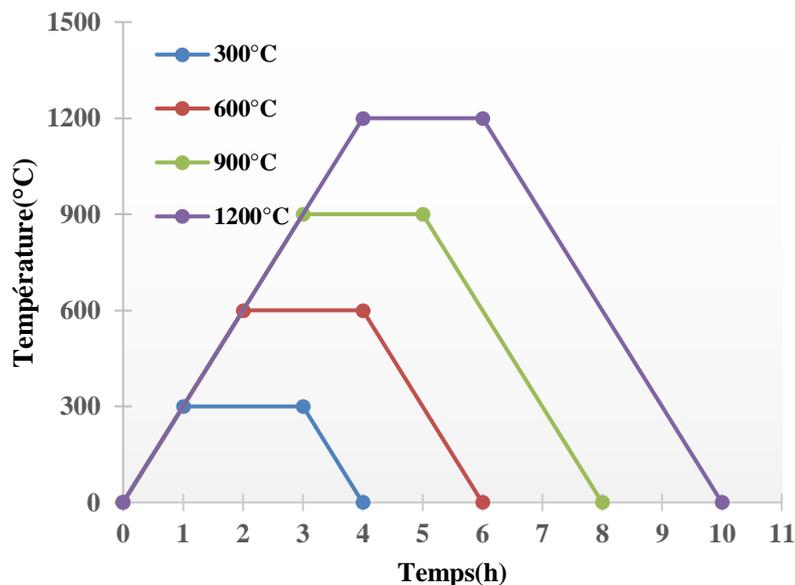


Figure 5: Profil de chauffage des BTC en fonction du temps

2.2.3 Méthodes de caractérisation des propriétés d'usages des BTC

2.2.3.1 Propriétés physico-mécaniques

2.2.3.1.1 Densité apparente et porosités accessibles à l'eau

La porosité est une grandeur physique, déterminé selon la norme française NF P18-459 [9]. Le principe de la méthode consiste à effectuer 2 pesées différentes : Une pesée lorsque les réseaux poreux de l'échantillon est saturée avec un liquide dont la densité est connue (l'eau) et une pesée à l'air libre. Cela permet de déterminer la porosité accessible à l'eau et la masse volumique à travers les expressions suivantes :

Le calcul de la porosité accessible à l'eau exprimée en pourcentage volumétrique est donné par la formule de l'équation 1 :

$$P_{eau} = \frac{M_{sat.air} - M_{sec}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \times 100 \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

- ✓ P_{eau} : Porosité accessible à l'eau en % ;
- ✓ $M_{sat.air}$: masse saturée à l'air de l'éprouvette saturée en kg ;
- ✓ M_{sec} : masse de l'éprouvette séchée jusqu'à masse constante en kg ;
- ✓ $M_{sat.eau}$: masse saturée d'eau en kg.

Après la pesée hydrostatique, on détermine la densité apparente en utilisant la formule :

$$\rho_{app} = \frac{M_{sec} \times \rho_{eau}}{M_{sat.air} - M_{sat.eau}} \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

- ✓ M_{sec} : masse de l'éprouvette séchée jusqu'à masse constante en kg ; ρ_{eau} : masse volumique de l'eau kg/m^3 ;
- ✓ $M_{sat.air}$: masse s à l'air de l'éprouvette saturée en kg ;
- ✓ $M_{sat.eau}$: masse saturée d'eau en kg.

2.2.3.1.2 Résistance à la compression sèche et humide

La résistance en compression est une grandeur mécanique qui se traduit par l'effort de compression uni axial atteint à la rupture complète de la brique. Elle a été évaluée sur des échantillons de BTC de dimensions normalisées ($29.5 \times 14.5 \times 9.5 \text{ cm}^3$). L'essai a été réalisé suivant la norme XP P13-091 (AFNOR 2017). Les briques ont été découpée transversalement par sciage en deux parties égales, puis superposée entre deux plaques métalliques comme indique la figure 6. Les deux faces coupées sont opposées de telle manière que la répartition de la charge soit homogène après la superposition. À l'aide d'une presse hydraulique (ETI-PROETI) d'une capacité de 300 kN et un taux de chargement de 0,5 kN/s, l'essai est alors lancé et les deux plaques se resserrent progressivement avec une vitesse de chargement de 0,02mm/s comprimant ainsi les deux blocs jusqu'à la rupture. Lorsqu'elle en passe à l'état sec, on parle de la résistance à compression sèche.

L'essai de la résistance en compression humide a été réalisé identiquement lorsque les échantillons ont été immergés totalement dans de l'eau pendant 2 heures avant de subir la charge de la presse.

Les valeurs des différentes résistances, R_c [MPa] ont été déduites de l'expression de l'équation, où :

- ✓ F_{max} est la charge maximale à la rupture en kN,
- ✓ S est la surface de compression des demi-blocs en cm^2

$$R_c = \frac{F_{max}}{S} \quad \text{Équation 3}$$



Figure 6: Dispositif expérimental pour l'essai de compression

2.2.3.2 Propriétés de durabilité

2.2.3.2.1 Résistance à l'abrasion

Le coefficient d'abrasion est une grandeur qui consiste à évaluer la durabilité des blocs sur le long terme. Pour déterminer le coefficient d'abrasion, nous avons réalisés l'essai d'abrasion dans but de simuler le comportement des BTCs vis-à-vis des différentes érosions pouvant être dues à l'activité humaine ou du vent charriant des granulats. Cet essai a été réalisé conformément à la norme XP P 13-901. À l'aide d'une brosse métallique en acier de type de celle décrite sur la figure 5 et chargée d'une masse de 3 Kg utilisée pour simuler ces effets. Nous avons fait passer la brosse sur une des faces du parement de la BTC en raison d'un aller-retour (mi-parcours) par seconde pendant une minute soit 60 aller retours sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation. Les particules se détachent au fur et à

mesure que la brosse passe. Un sillon rectangulaire est formé sur la brique traduisant les dégradations. La brique est ensuite pesée, connaissant la masse initiale on peut déterminer le coefficient d'abrasion. La valeur du coefficient est calculée par l'équation 4.

$$C_{ab} = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad \text{Équation 4}$$

- ✓ C_{ab} est le Coefficient d'abrasion
- ✓ M_0 est la masse initiale en gramme
- ✓ M_1 est la masse après brossage en gramme
- ✓ $S = L \cdot l$: Surface du sillon rectangulaire
- ✓ L : Longueur de la brique en cm
- ✓ l : largeur de la brosse en cm

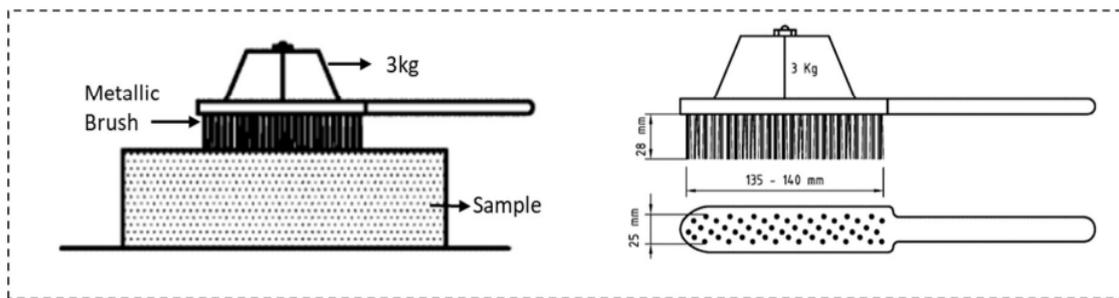


Figure 7: Dispositif expérimental pour l'essai d'abrasion

2.2.3.2.2 Résistance à l'érodabilité

L'érodabilité est une grandeur de durabilité. Elle consiste à simuler le comportement des BTC à un phénomène de vieillissement naturel dû à l'effet de pluie. L'essai d'érodabilité a été réalisé conformément à la norme. Nous avons soumis nos échantillons à une pression constante d'eau de 5 bars. Les BTCs testées ont été placées à une distance de 470 mm du jet d'eau pendant une heure et à chaque 15 minutes on observe de près la profondeur de pénétration d'eau. Après une heure nous avons arrêté la pompe à jet d'eau et nous avons mesuré différentes profondeurs. La figure 8 illustre le dispositif de réalisation de l'essai.

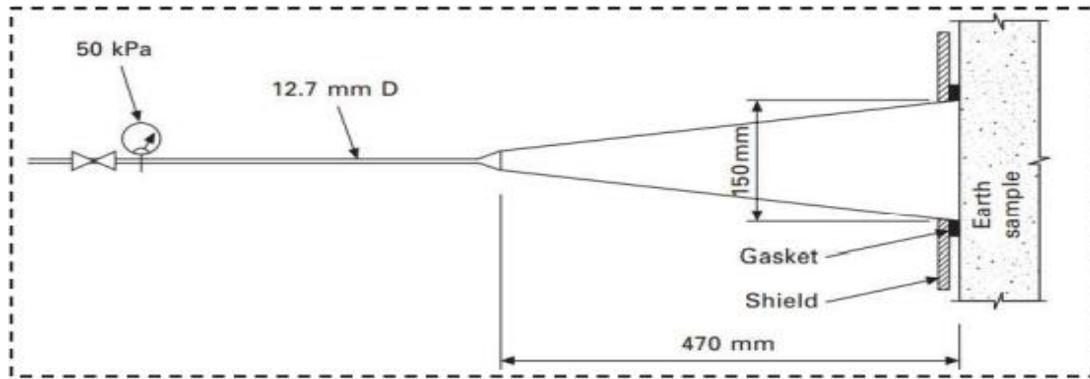


Figure 8: Dispositif expérimental pour l'essai d'érosion

2.2.3.3 Propriétés hydriques

2.2.3.3.1 Absorption par capillarité

L'absorption capillaire est un phénomène physique, hydrique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux du fait de la remontée capillaire. L'essai d'absorption capillaire consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par la brique qui entraîne un gain de masse du matériau. Il a été réalisé sur les échantillons de BTC en s'inspirant du protocole de la norme XP P 13-901 (2017). Les échantillons préalablement séchés à masse constante sont plongés dans un récipient contenant de l'eau à une hauteur constante de 0,5 cm. Une pesée successive sur une balance a été faite à des intervalles de temps (15 min, 30 min, 45 min, 1h, 2h, 4h, 8h, 16h, 24h). Cette variation de la masse de l'échantillon en fonction du temps nous permet de modéliser le phénomène d'absorption capillaire à travers l'équation 3. :

$$C_{ac} = \frac{m_h - m_s}{S} \quad \text{Équation 5}$$

- ✓ m_h : Masse humide en (g)
- ✓ m_s : Masse sèche en (g)
- ✓ S : Surface de la brique Cm^2
- ✓ C_{ac} : Coefficient d'absorption en g/Cm^2

À la sortie de cet essai on peut déterminer le coefficient caractéristique C_b issu de la norme AFNOR 20. Le temps de mesure conventionnel de la norme est 10 minutes. Le coefficient C_b est exprimé par l'équation :

$$C_b = \frac{M}{S \times \sqrt{t}} \times 100 \quad \text{Équation 6}$$

- ✓ C_b : Coefficient caractéristique AFNOR en g/cm^2*s
- ✓ T : Temps en 10 minutes
- ✓ S : Surface de la brique cm^2

2.2.3.3.2 Absorption par immersion totale

L'absorption capillaire permet de mettre en évidence le coefficient d'absorption mais n'indique pas la quantité d'eau que le matériau peut stocker. Pour la connaître, il faut déterminer la teneur en de saturation libre qui est le résultat des mouvements capillaires dans les pores qui sont ouvert sur le milieu ambiant. Elle est déterminée par immersion totale d'un échantillon dans l'eau pendant 24h. L'absorption totale peut être exprimée en pourcentage de la masse initiale de l'éprouvette ou exprimée en masse d'eau contenue dans un échantillon. La valeur est utilisée pour estimer la teneur en eau du matériau à 100% d'humidité relative. La déduction de l'absorption se traduit par l'équation.

$$W_f = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Équation 7}$$

- ✓ W_f : Immersion total en %
- ✓ m_h : Masse humide en (g)
- ✓ m_s : Masse sèche en (g)

CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à la présentation, analyse et interprétation des différents résultats de caractérisations des BTCs stabilisés.

3.1 Aspects des BTCs après la tenue à haute température

Après avoir été exposée à températures élevées (300°C, 600°C, 900°C et 1200°C), les BTC stabilisés au ciment et à la chaux ont subi des changements de couleurs. Les figures 8 et 9 illustrent ces changements de couleur, respectivement pour les BTCs stabilisés au ciment et à la chaux.

✓ BTC au ciment

Sur la figure 9, on observe un changement de couleur du rouge brique au marron clair et au rouge orange respectivement à Tam, 300°C et 600°C. Ces changements sont dus à plusieurs réactions thermochimiques, notamment l'oxydation des minéraux ferreux dans la brique, qui se produisent lorsque la température atteint 600°C.

Sur la face des briques exposées à 900°C et 1200°C, des fissures sont visibles, et la couleur passe du rouge orange au noir rosé. La présence de ces fissures serait liée à l'évaporation de l'eau libre. Les vapeurs produisent une pression, provoquant une expansion du volume sans contrainte, ce qui initié la propagation des fissures.

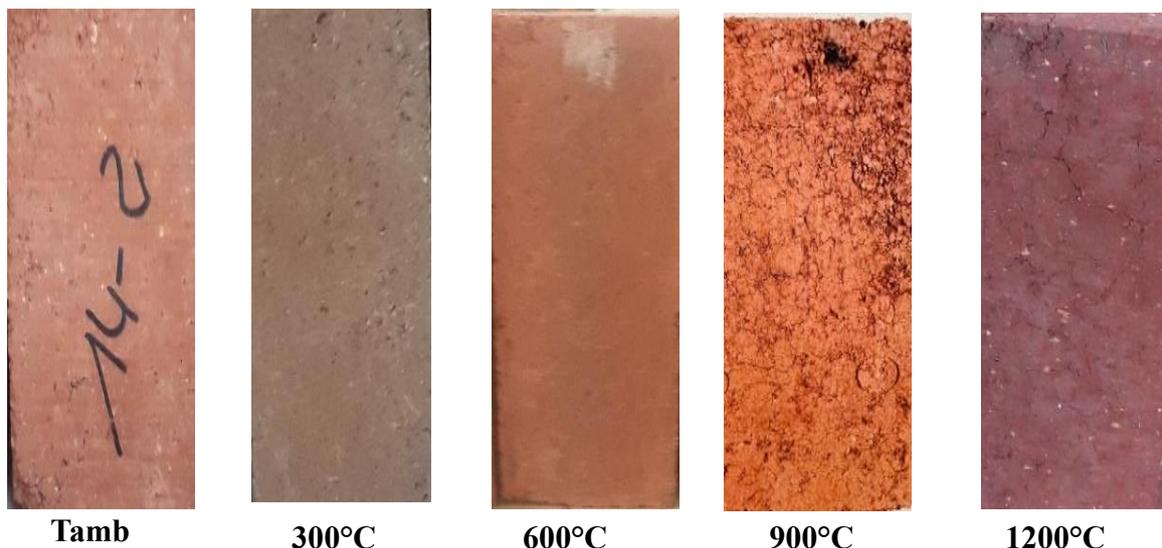


Figure 9:BTC stabilisée au ciment après exposition à haute température

✓ BTCs à la chaux

Sur la figure 10, on observe un changement de couleur d'orange clair à rouge fumé pour une température allant de Tam à 600°C, ce qui serait lié à l'oxydation minéraux ferreux dans la brique. À 900°C, les BTCs ont une couleur orange avec des taches blanchâtres, cela s'expliquer par la décomposition de la calcite CaCO_3 en CaO et aux environs de 1200°C, les fissures très prononcées sont visibles à la surface des BTC avec une couleur de brûlure.

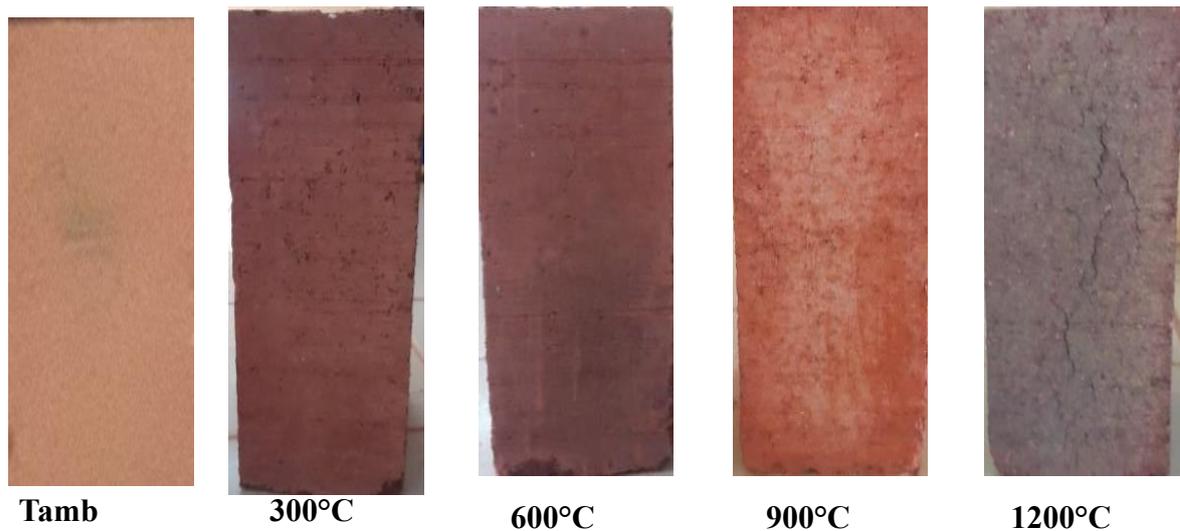


Figure 10:BTC stabilisée à la chaux après exposition à haute température

3.2 Influence sur les propriétés physico-mécanique

3.2.1 Masse volumique et porosité

La figure 11 ci-dessous présente la densité apparente et la porosité accessible à l'eau des BTC stabilisées au ciment après exposition à haute température. On constate que l'évolution de la densité apparente est inversement proportionnelle à la porosité accessible à l'eau. Les BTCs conditionnées à 1200°C présentent le plus grand pore (32%) et la plus faible densité de 1661 Kg/m alors que, les BTCs conditionnées à température ambiante présentent une porosité plus petite (26,03%) et une densité plus grande 1861 Kg/m³. La densité plus élevée et la faible porosité obtenues à température ambiante pourraient s'expliquer par l'hydratation du liant cimentaire et la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) qui se lie aux particules de la matrice (latérite) créant ainsi une densification du composite[12]. Quant aux BTC conditionnées à 1200°C, leur faible densité serait due à la présence des fissures prononcées qui

a occasionnée par l'évaporation et à la déshydratation de l'eau mécanique lors de l'exposition à haute température [5].

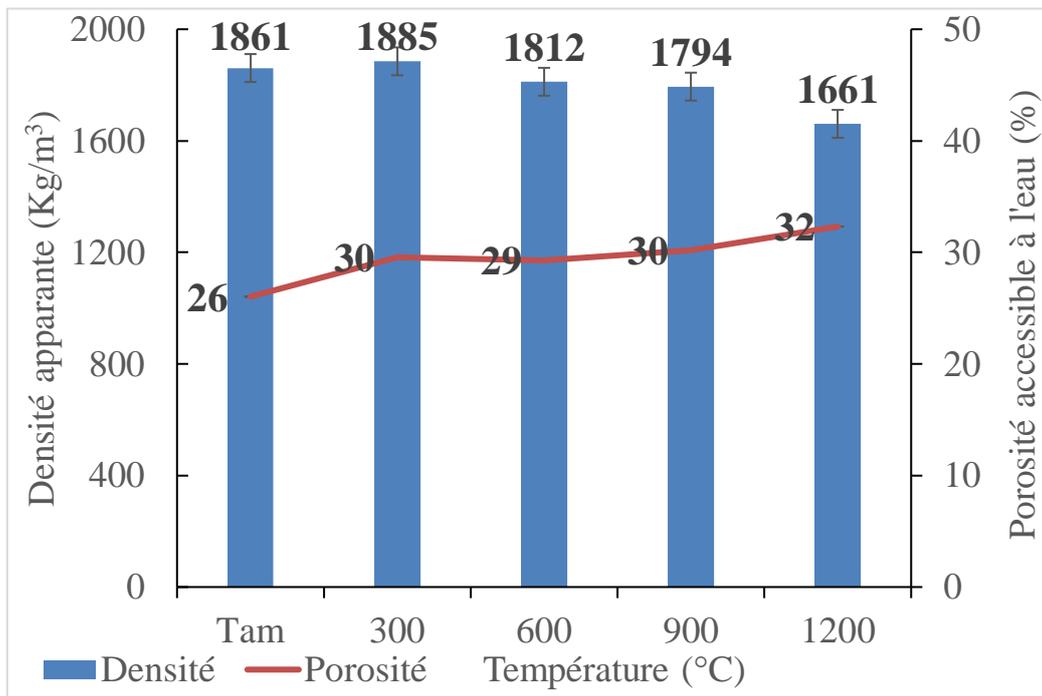


Figure 11 : Évolution de la densité et la porosité en fonction de la température des BTCs stabilisées au ciment

La figure 12 ci-dessous montre la densité apparente et la porosité accessible à l'eau de BTC qui ont été stabilisés à la chaux après exposition à des températures élevées. Il est évident que la variation de la densité apparente est inversement corrélée à la porosité accessible à l'eau. Les BTC qui ont été soumis à la température ambiante présentent moins de porosité (33%) et une densité plus élevée de 1749 kg/m³. En ce qui concerne les BTC chauffées à 300°C, 600°C et 900°C, les porosités sont respectivement 36%, 41%, 40% et les densités sont de 1745 kg/m³, 1642 kg/m³, 1635 kg/m³. Les BTC qui ont été chauffés à 1200°C ont une porosité (38%), et leur plus faible densité est de 1641 kg/m³.

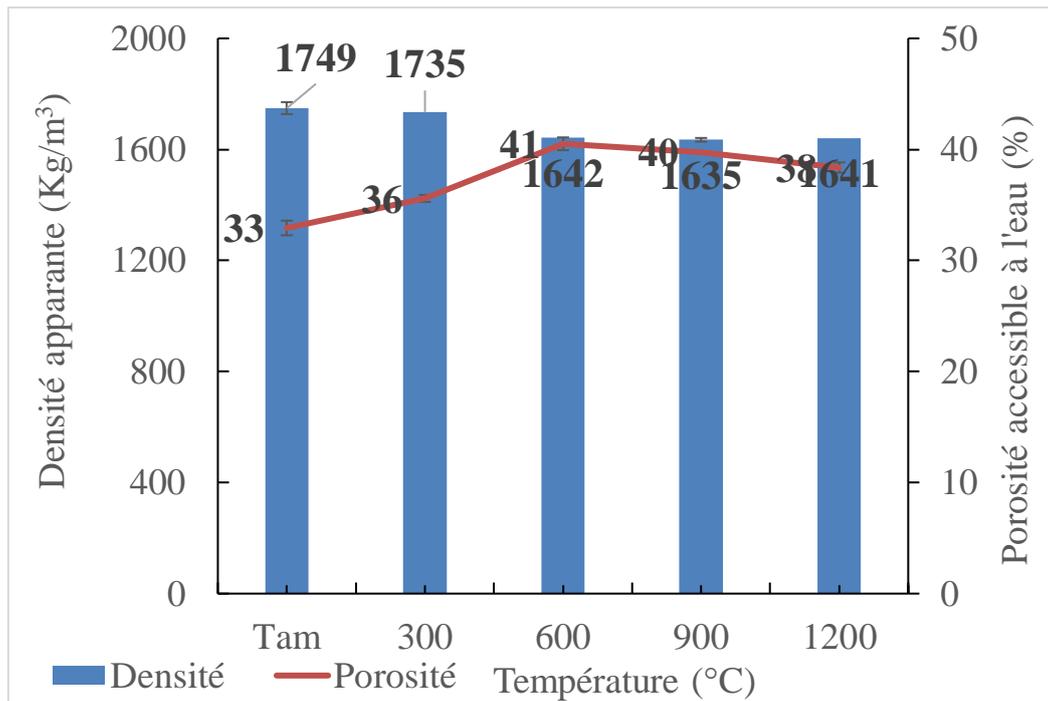


Figure 12 : Évolution de la densité et de la porosité en fonction de la température des BTCs stabilisées à la chaux

3.2.2 Résistance à la compression

- BTCs stabilisées au ciment

La Figure 13 présente les résultats des résistances à la compression sèche et humide des BTCs stabilisées au ciment après exposition à très hautes températures. L'évolution de la température a permis de constater une variation croissante et décroissante de la résistance en compression sèche. En observant comparativement aux échantillons témoin. L'augmentation de la température d'exposition de Tam à 300°C apporte près de 38% d'amélioration de la résistance. L'augmentation de la température d'exposition de Tam à 600°C apporte près de 77% d'amélioration de la résistance. Cette amélioration de la résistance en compression sèche est comparable à celle obtenue par Nshimiyimana et al. (2022) qui est de 58% (4.2 à 6.6 MPa) à 600°C avec 8% de ciment et une vitesse de chauffage de 1°C/min. De plus Bakam et al (2020) ont obtenu une résistance de 1.21 N/mm² à 200°C et 2.37 N/mm² à 800°C avec 2% de ciment, et ont affirmé que la résistance augmente avec l'augmentation de la température. Au-delà de 600°C, une diminution de la résistance moyenne en compression sèche est constatée. La résistance a diminué de 26% de Tam à 900°C et de 79% à de Tam à 1200°C. Cette diminution de la résistance s'explique par la présence des fissures sur la surface des BTCs et ces fissures sont défavorable pour la mesure de la résistance.

En ce qui concerne la résistance à la compression humide, elle a été observée après 2 heures d'immersion dans l'eau. Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure 9. La résistance en compression humide des BTCs stabilisés au ciment est environ la moitié de la résistance en compression sèche, pour les mêmes températures d'exposition données sauf 900°C et 1200°C. La résistance en compression humide varie de 5,10 MPa à 7,85 MPa après exposition à une température de 300°C à 600°C. La résistance en compression humide varie également de 4,76 MPa à 1,28 MPa après exposition à une température de 900°C à 1200°C. Cette baisse de résistance par rapport à la résistance à la compression sèche s'explique par le fait qu'avec une teneur en eau plus élevée, les argiles se liquéfient et perdent leur cohésion et aussi par le fait que l'eau s'infiltre dans les pores et tend à écarter les particules dans la matrice principale, ce qui crée des zones de fragilité[15]. Le tableau ci-dessous présente les différentes classes de BTCs en fonction de la norme Classement norme XP P 13-901. Selon cette norme nos BTCs sont de classe BTC60 de Tam jusqu'à 600°C, de classe BTC40 à 900°C, de classe BTC20 à 1200°C en compression sèche et de classe BTC40 à Tam, 300°C et 900°C, de classe BTC60 à 600°C et à 1200°C les BTCs sont de classe BTC20 en compression humide. A retenir que les BTC60 peuvent être utiliser comme mur porteur et BTC40 et BTC20 comme mur non porteur.

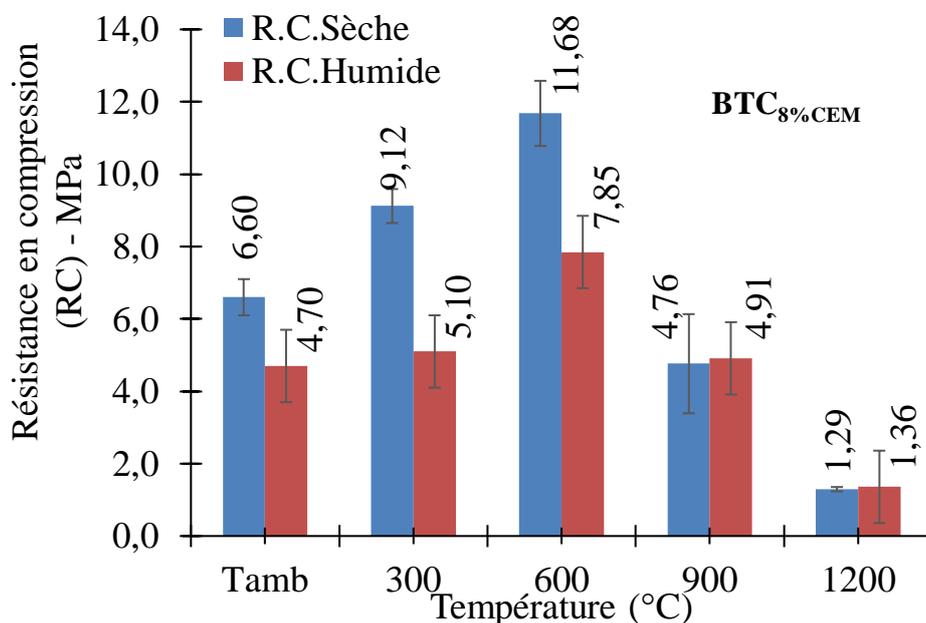


Figure 13: Résistance à la compression sèche et humide des BTC stabilisés au ciment

- BTCs stabilisées à la chaux

La figure 14 indique l'évolution de la résistance à la compression sèche et humide des BTC stabilisées à la chaux en fonction de la température d'exposition. Elle présente une amélioration de près de 55% de la résistance de Tam à 300°C et de près de 86% de Tam à 600°C, contrairement aux échantillons exposés à 900°C et 1200°C qui présentent une diminution significative de 12% de Tam à 900°C et de 74% de Tam à 1200°C. Quant à la résistance à la compression humide, on remarque les mêmes tendances avec des valeurs correspondantes à la moitié de la résistance à la compression sèche pour les mêmes températures d'exposition. Le maximum est observé à 600°C avec 3.51 MPa et le minimum à 1200°C avec 0.75 MPa. Le témoin conditionné à température ambiante a enregistré une résistance moyenne à la compression humide de 2.09 MPa. L'augmentation de la résistance à la compression sèche est à la réaction pouzzolanique entre les matériaux de terre et la chaux hydratée (Ca (OH)) contenu dans le résidu[16] . Le tableau ci-dessous présente les différentes classes de BTCs en fonction de la norme Classement norme XP P 13-901. Selon cette norme nos BTCs sont de classe BTC60 de Tam jusqu'à 600°C et de classe BTC20 au-delà de 600°C en compression sèche et de classe BTC60 de Tam à 600°C au-delà de 600°C, les BTCs sont de classe BTC20 en compression humide. Les BTC60 peuvent être utiliser comme mur porteur et BTC40 et BTC20 comme mur non porteur.

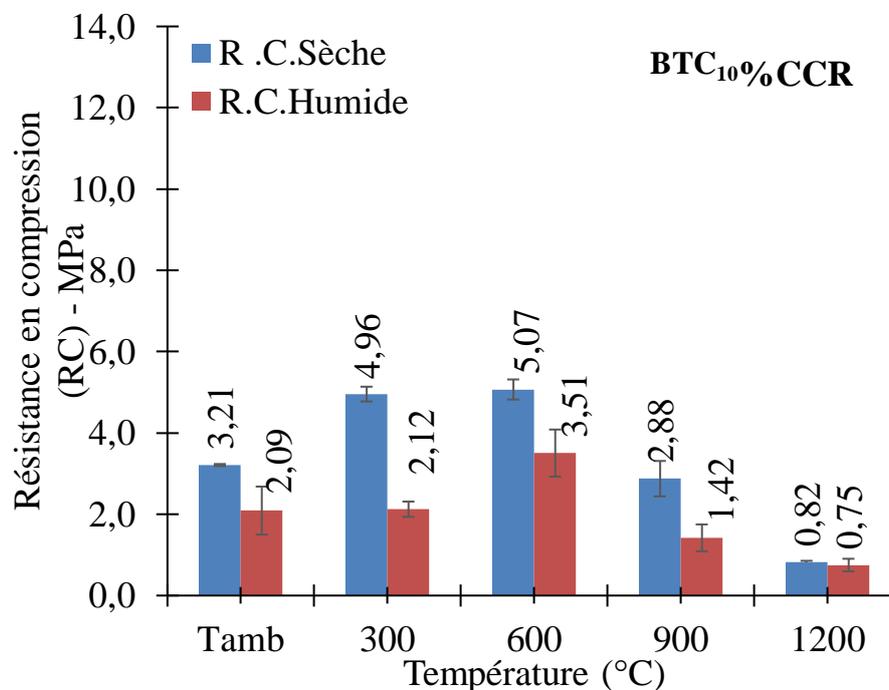


Figure 14: Résistance à la compression sèche et humide des BTC stabilisées à la chaux

Tableau 8: Classement des résistances à la compression sèche et humide des BTC

ID	Résistance à la compression sèche Rcs (Mpa)	Classement norme XP P 13-901	Résistance compression Humide Rch (Mpa)	Classement norme XP P 13-901
KCEM8_Tam	6.60	BTC 60	4.70	BTC 60
KCEM8_300	9,12	BTC 60	5.10	BTC 60
KCEM8_600	11.68	BTC 60	7.87	BTC 60
KCEM8_900	4.76	BTC 40	4.91	BTC 60
KCEM8_1200	1.29	BTC 20	1.36	BTC 20
KCCR10_Tam	3.21	BTC 20	2.09	BTC 40
KCCR10_300	4.96	BTC 40	2.12	BTC 40
KCCR10_600	5.97	BTC 40	3.51	BTC 60
KCCR10_900	2.88	BTC 20	1.42	BTC 20
KCCR10_1200	0.82	BTC 20	0.75	BTC 20

3.3 Influence sur les indicateurs de durabilités

3.3.1 Absorption d'eau par capillarité

La sorptivité représente la vitesse d'absorption d'eau par capillarité par les BTC. Cette vitesse est autant plus que le diamètre des pores est grand [17]. Aussi, la pente des droites de régression des coefficients absorption par capillarité renseigne sur le diamètre moyen des pores accessible à l'eau. En effet, il s'agit d'un coefficient multiplicateur entrant dans la formule de calcul du diamètre moyen de ces dits pores.

La figure 15 ci-dessous présente la sorptivité des BTC stabilisées au ciment. Elle a une valeur de $0.077\text{g}/\text{Cm}^2.\text{min}^{1/2}$ pour les BTC conditionnées à température ambiante et évolue de $0.096\text{g}/\text{Cm}^2.\text{min}^{1/2}$ à $0.091\text{g}/\text{Cm}^2.\text{min}^{1/2}$ pour les températures allant de 300°C à 600°C et diminue de $0.061\text{g}/\text{Cm}^2.\text{min}^{1/2}$ à $0.0026\text{g}/\text{Cm}^2.\text{min}^{1/2}$ respectivement à 900°C et 1200°C .

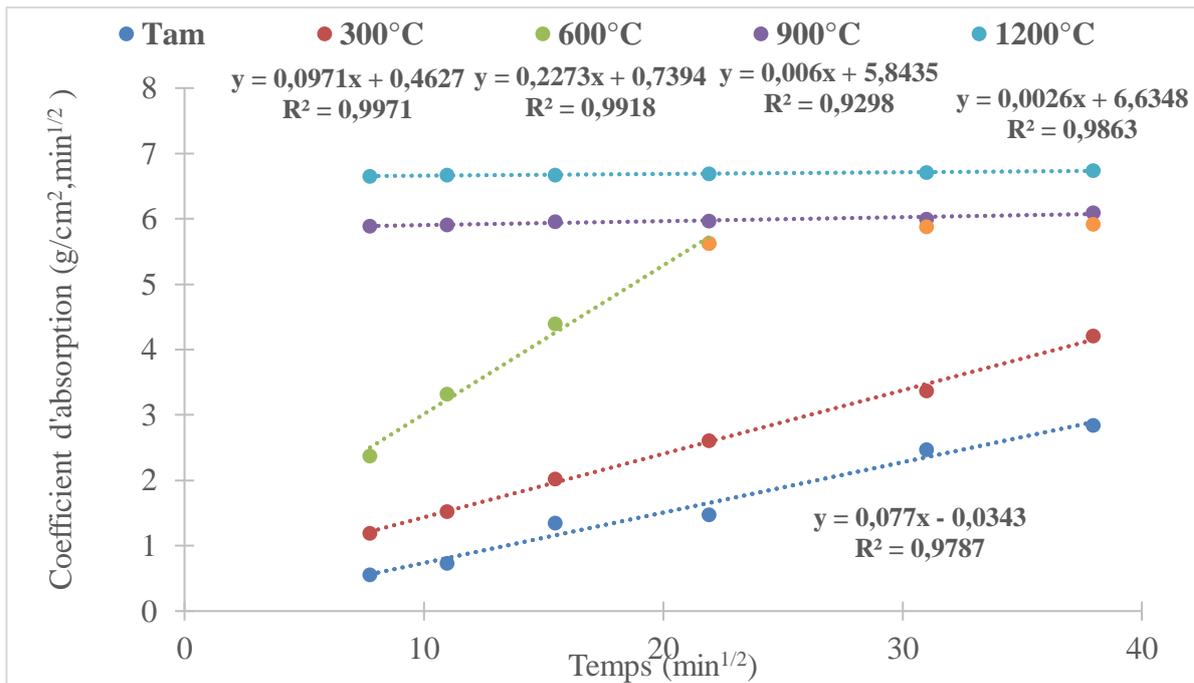


Figure 15: Absorption d'eau par capillarité des BTC stabilisée au Ciment (Sorptivité de 1H à 24H)

En ce qui concerne les BTC stabilisées à la chaux, présentent sur la figure 16, une sorptivité maximale de 0.158g/ Cm².min^{1/2} pour une température de 600°C et 0.138g/ Cm².min^{1/2} à 300°C et elle passe de 0116g/ Cm².min^{1/2} à 0.0119g/ Cm².min^{1/2} respectivement à 900°C et 1200°C.

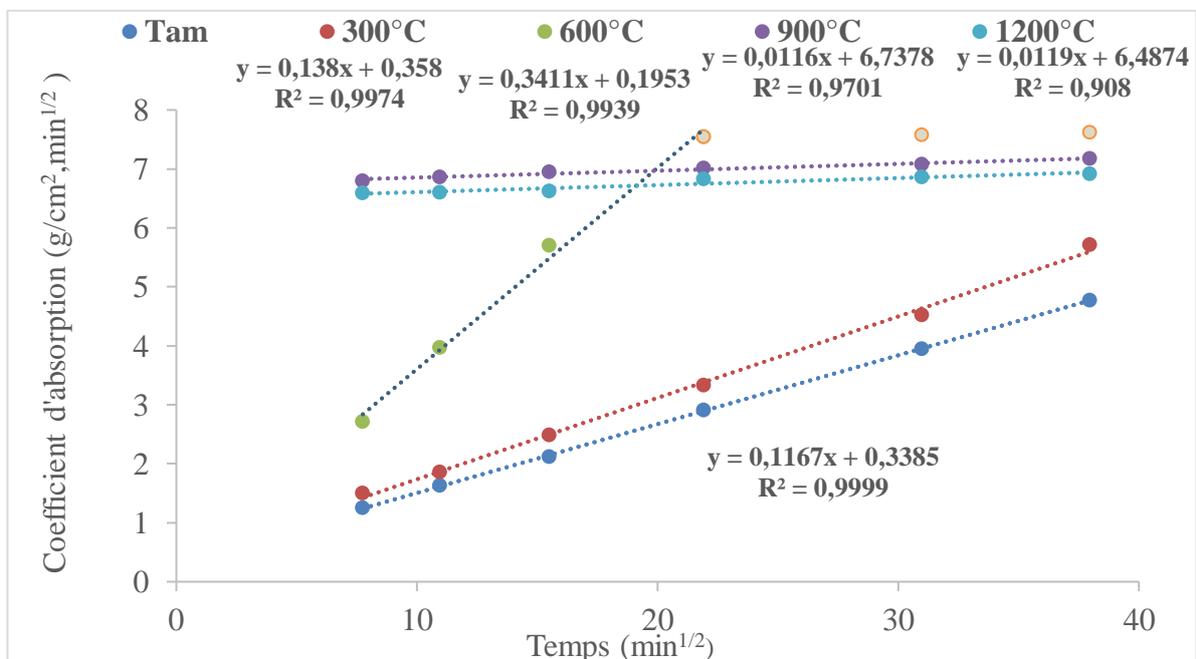


Figure 16: Absorption d'eau par capillarité des BTC stabilisée à la chaux (Sorptivité de 1H à 24H)

Le coefficient d'absorption capillaire (Cb10min) a été déterminé après 10 minutes d'immersion partielle des BTC. Le Cb10min des BTCs stabilisées au ciment après exposition à haute température (300°C, 600°C, 900°C et 1200°C). Le Cb10min permet d'évaluer le taux initial d'absorption d'eau dans les pores plus large et c'est en ce sens que toutes les BTC ont enregistré le taux le plus élevé dans les premières minutes d'absorption et qui a diminué avec le temps.

Sur la figure 17, présentant le coefficient Cb 10 mn des BTC stabilisées au ciment. On remarque une évolution significative du coefficient avec une valeur de 18.73 g/ Cm².min^{1/2}, 31.29 g/ Cm².min^{1/2}, 114.44 g/ Cm².min^{1/2}, 208.73 g/ Cm².min^{1/2} et 13.37 g/ Cm².min^{1/2} pour l'échantillon témoin respectivement à température ambiante, 300°C, 600°C, 900°C, et 1200°C.

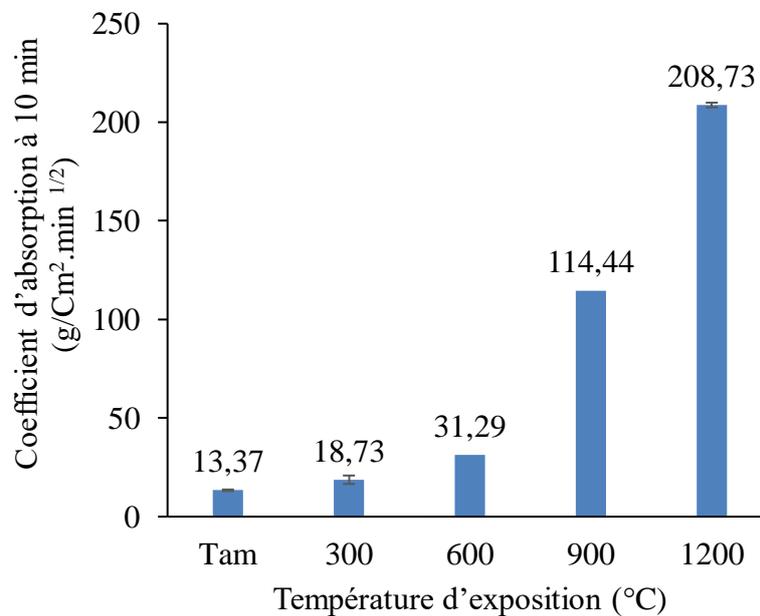


Figure 17 : Évolution du coefficient d'absorption Cb10min en fonction de la température pour les BTC stabilisées au ciment

Et celles qui ont été stabilisées avec la chaux (figure 18) ont une valeur de 22.56 g/ Cm².min^{1/2}, 37.77 g/ Cm².min^{1/2}, 120.31 g/ Cm².min^{1/2}, 205.76 g/ Cm².min^{1/2} et 5.56 g/ Cm².min^{1/2} pour l'échantillon témoin. On remarque également une tendance similaire entre le BTC stabilisées au ciment et à la chaux, cette tendance évolue de façon significative en fonction de la température. Cela s'explique d'une manière générale, par la suite de la phase d'évaporation et de déshydratation, les échantillons deviennent moins résistants face à l'absorption capillaire car lorsque la brique perd de l'eau, elle devient très sensible à l'eau [18]. De plus au bout de 900°C, les pores sont plus grossiers et se traduisent par l'apparition des fissures et peuvent être associé à la transformation du Quartz alpha en Quartz beta et la décomposition du CaCO₃ et de l'illite

en Mica. De ce qui suit, la température aurait un effet négatif au-delà de 600°C sur les propriétés hydriques plus précisément le coefficient d'absorption Cb 10min car le volume des vides est lié à la quantité d'eau que le bloc peut absorber [14].

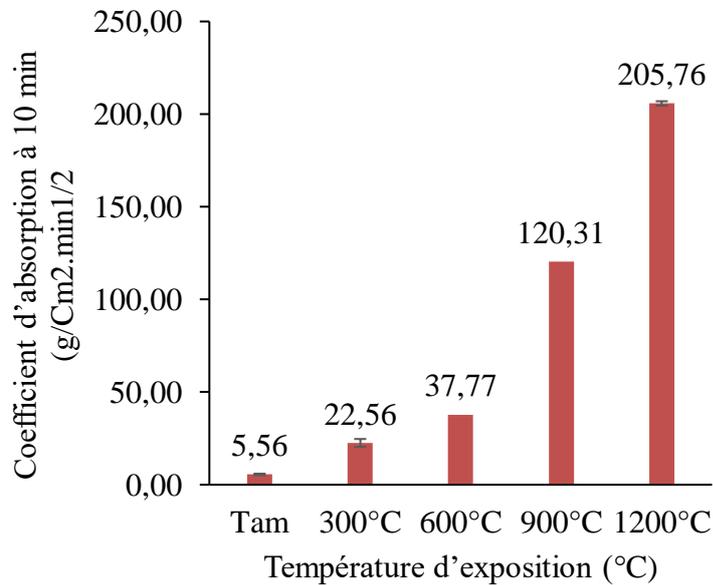


Figure 18: Évolution du coefficient d'absorption Cb10min en fonction de la température pour les BTC stabilisées à la chaux

Tableau 9 Coefficient d'absorption Cb10min et leur classification BTC stabilisées au ciment et à la chaux

ID	Cb (g/cm ² .min ^{1/2})	Classement norme XP P 13-901
KCEM8_Tam	13,32	BTC faiblement capillaire
KCEM8_300	18,73	BTC faiblement capillaire
KCEM8_600	31,29	BTC peu capillaire
KCEM8_900	114,44	BTC très capillaire
KCEM8_1200	208,73	BTC très capillaire
KCCR10_Tam	5,56	BTC faiblement capillaire
KCCR10_300	22,56	BTC peu capillaire
KCCR10_600	37,77	BTC peu capillaire
KCCR10_900	120,31	BTC très capillaire
KCCR10_1200	205,76	BTC très capillaire

3.3.2 L'absorption par immersion totale

Les résultats des teneurs en eau à la saturation libre des différentes BTC nous informes sur leur capacité à absorber et stocker l'eau, ce qui confère à ce paramètre un caractère très important pour les BTC. En effet moins est l'absorption d'eau d'un bloc, mieux il conservera ses performances mécaniques en milieu humide. Sur la figure19, présentant les BTCs stabilisées au ciment (a), nous pouvons observer une teneur en eau qui augmente au fur et mesure que la température augmente. Nos BTC exposée à 1200°C ont absorbé en moyenne près de 21.31% d'eau en 24 H d'immersion totale tandis que celle conditionnée à température ambiante ont absorbée près de 10%. Celles qui ont été stabilisées à la chaux (b) présentent une teneur eau en 24H allant de 18% à 24% respectivement à Tam et à 600°C.

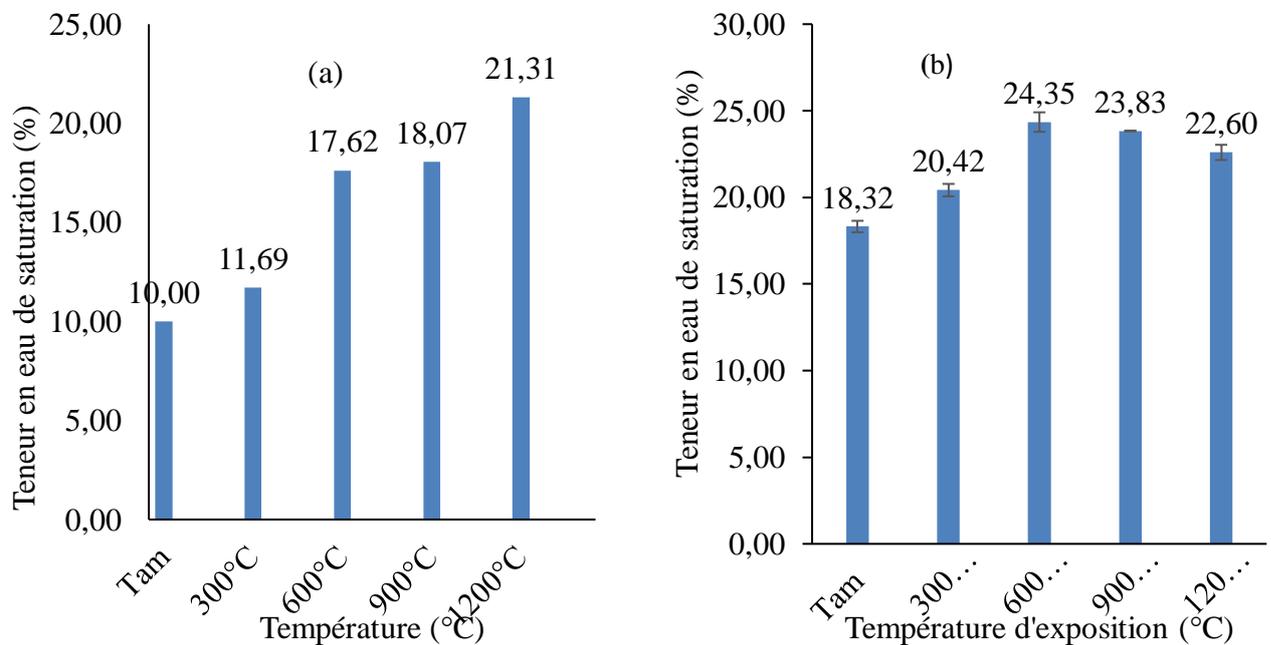


Figure 19 : Immersion totale 24H des BTCs stabilisées au ciment(a) et à la chaux(b) en fonction de la température

3.3.3 Résistance à l'abrasion

Le coefficient d'abrasion Ca correspond à la surface abrasée par la perte masse après 60 aller-retour de la brosse métallique. La figure 20 présente le coefficient d'abrasion (a) et la perte de masse (b) des BTCs stabilisées au Ciment en fonction des différentes températures d'exposition. Selon la norme XP P13-901(2017) qui donne un classement des BTC en fonction des valeurs normatives du coefficient d'abrasion (Ca), toutes les BTCs exposées (Tam, 300°C, 600°C, 900°C) qui ont présenté un Ca supérieur à 7 $\text{Cm}^2.\text{g}^{-1}$ (tableau), sont de classe BTC 60. Cependant, les BTCs exposées à 1200°C, avec un Ca inférieur à 5 $\text{Cm}^2.\text{g}^{-1}$ sont BTC 20 sensible à l'abrasion.

Par ailleurs, la perte de masse des BTCs étudiées après l'essai variait de **0.018%** à **0.170%** en fonction de la température d'exposition. La plus grande valeur de perte de masse est attribuée aux BTCs exposées à 1200°C contre une perte de masse plus faible affichée par les BTCs exposées à température ambiante. Elles sont toutes inférieures à 10% comme recommandée par la norme ARS 675[19].

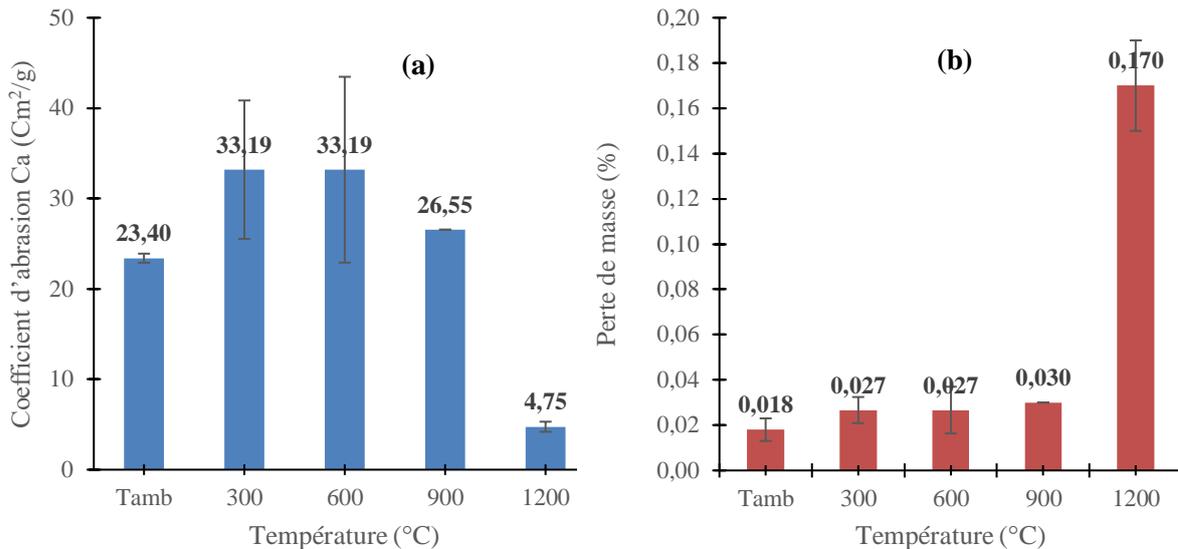


Figure 20: Évolution du coefficient d'abrasion et de la perte de masse en fonction de la température des BTC stabilisés au ciment

La figure 21 présente le coefficient d'abrasion (a) et la perte de masse (b) des BTCs stabilisées au Ciment en fonction des différentes températures d'exposition. Selon la norme XP P13-901 [7], qui classe les BTCs selon des valeurs normatives pour le coefficient d'abrasion (Ca), tous les BTCs exposés (Tam, 300°C, 600°C,) qui ont montré un Ca supérieur à 7 Cm².g-1 sont de classe BTCs 60. Cependant, les BTCs exposés à 600°C avec un Ca supérieur à 5 Cm².g-1 sont classées BTC 40 sensibles à l'abrasion tandis que celles qui ont été exposées à 900°C et 1200°C sont classées BTC 20 trop sensible à l'abrasion.

En outre, la perte de masse des BTCs testés après l'expérience variait de 0,060 % à 0,21 % en fonction de la température d'exposition. La valeur la plus élevée de perte de masse est attribuée aux BTCs exposée à 1200°C, par rapport à une perte de masse plus faible montrée par les BTCs Conditionnées à température ambiante. Toutes ces valeurs sont inférieures à la valeur recommandée de 10% décrit dans l'ARS 675[19].

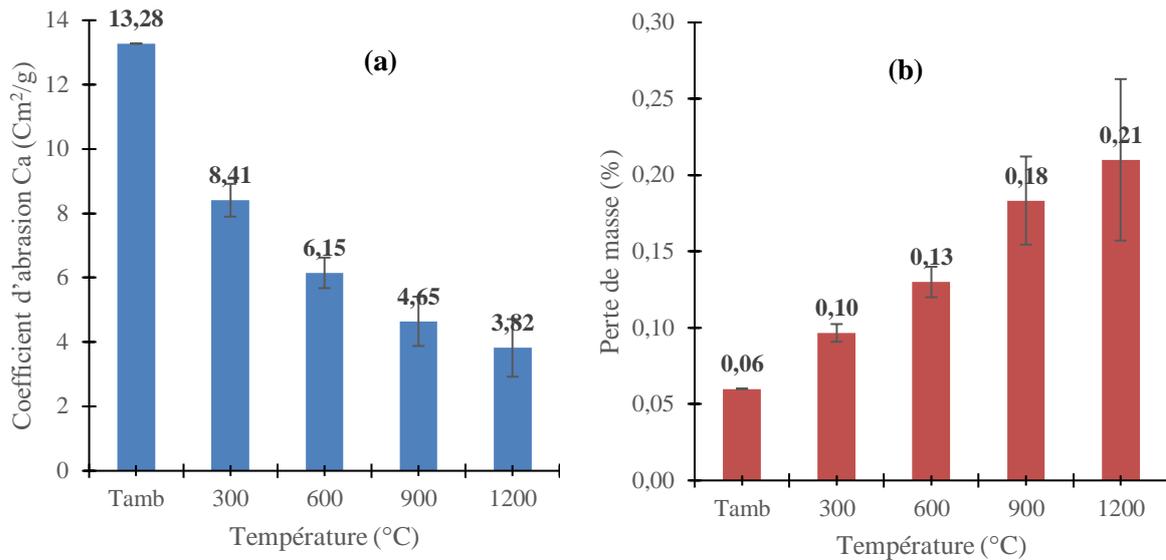


Figure 21: Évolution du coefficient d'abrasion et de la perte de masse en fonction de la température des BTC stabilisées à la chaux

Tableau 10: Classement du coefficient d'abrasion des BTC XP P 13-901

ID	Coefficient d'abrasion Cab (Cm ² /g)	Classement norme XP P 13-901
KCEM8_Tam	23.40	BTC 60
KCEM8_300	33.19	BTC 60
KCEM8_600	33.19	BTC 60
KCEM8_900	26.55	BTC 60
KCEM8_1200	4.75	BTC 20
KCCR10_Tam	13.28	BTC60
KCCR10_300	8.41	BTC60
KCCR10_600	6.15	BTC40
KCCR10_900	4.65	BTC20
KCCR10_1200	3.82	BTC20

3.3.4 Résistance à l'érodabilité

La figure 22 présente l'évolution de la profondeur érodée (a) et la surface érodée(b) en fonction de la température d'exposition des BTC stabilisées au ciment. On remarque que les BTC exposées à 900°C présentent la plus grande valeur de profondeur d'érosion de 5.05 mm.h⁻¹ contre des profondeurs plus faibles pour les BTCs exposées à Tam, 300°C, 600°C et 1200°C,

respectivement 3 ; 2.15 ; 2.58 ; et 4 mm.h⁻¹. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de la température qui rend BTCs de plus en plus sensible à l'érosion. Les profondeurs d'érosion de toutes les BTCs étudiées sont inférieures à 120 mm.h⁻¹, valeur limite de la norme NZS 4298 (1998). Par conséquent, elles peuvent être classées comme des briques non érodables.

La surface érodée des BTCs augmente au fur et à mesure que la température d'exposition augmente jusqu'à atteindre 900°C. La plus grande surface érodée est observée à 900°C avec une valeur de 32.85 % la plus petite surface à température ambiante d'une valeur de 7.18 %. Ces résultats montrent que les BTCs stabilisées au ciment résistent mieux à l'érosion après une exposition allant jusqu'à 600°C par rapport aux BTCs exposées à 900°C et 1200°C.

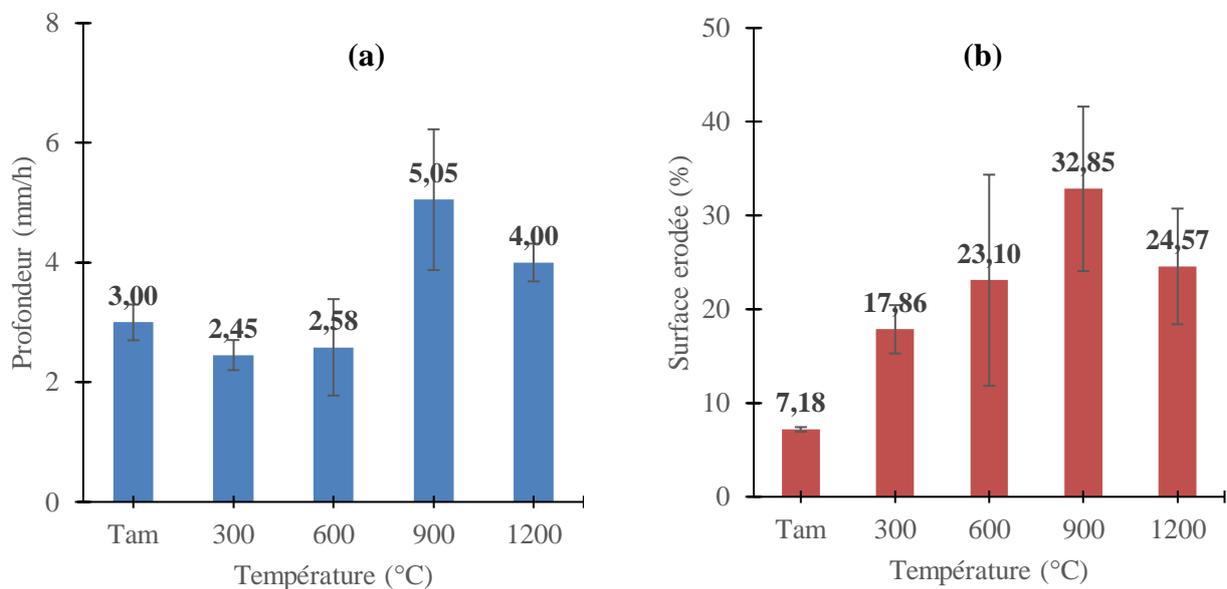


Figure 22 : évolution de la Profondeur d'érosion et la perte en fonction de la température des BTCs stabilisés au ciment

La figure 23 présente la résistance à l'érodabilité des BTCs stabilisées à la chaux. On remarque que la profondeur érodée varie de 3.95 mm.h⁻¹ à 7.07 mm.h⁻¹ pour des températures allant de 600°C à 1200°C. Les échantillons exposés à 300°C ont une profondeur de 4.34 mm.h⁻¹ et les BTCs conditionnées à Tam à une profondeur de 4.74 mm.h⁻¹. Toutes les BTC étudiées avaient des profondeurs d'érosion inférieures à 120 mm/h, ce qui est le maximum autorisé par la norme NZS 4298 (1998). Par conséquent, elles pourraient être classées comme des briques non érodables.

La surface décroît de façon continue comparativement aux BTCs exposées à Tam qui présentent une plus surface érodée de 33.85 % contre une plus petite surface de 19.45 % pour les BTCs exposés à 1200 °C.

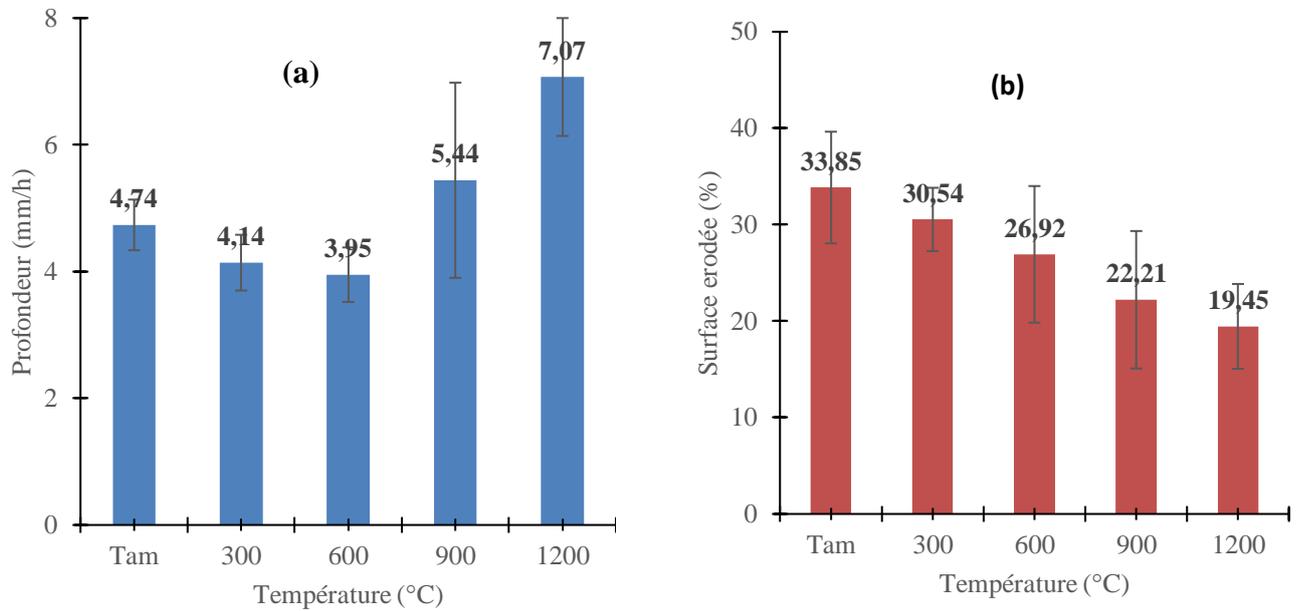


Figure 23 évolution de la Profondeur d'érosion (a) et la perte (b) en fonction de la température des BTCs stabilisées à la chaux

CONCLUSION GENERALE

L'objectif global de ce travail s'inscrit dans une thématique de l'amélioration de la qualité de l'habitat humain au Burkina Faso. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la détermination des propriétés d'usages des BTCs stabilisés aux liants minéraux industriels (ciment et chaux) après leurs expositions à de hautes températures. Les résultats des différents essais montrent que l'augmentation de la température jusqu'à 600°C améliorent les principales propriétés des BTCs stabilisés au ciment et à la Chaux.

Du point de vue mécanique, les BTCs ont montré de bons résultats après avoir été exposés à des températures élevées (de la température ambiante à 600°C), le comportement mécanique s'est amélioré de 6,6 à 11,68 MPa en compression sèche pour les BTCs stabilisés au ciment et de 3,21 à 5,97 MPa en compression sèche pour les BTCs stabilisés à la chaux. Selon la norme de catégorisation XP P 13-901, les BTC de classe BTC 60 pouvant servir de murs porteurs après exposition à une température de 600°C. En ce qui concerne la résistance à la compression humide, les BTCs stabilisés au ciment et à la chaux ont perdu la moitié de leur résistance de Tam à 600°. Sur la base du rapport entre la résistance à la compression humide et sèche, les BTCs sont classées durable après une température de 600°C.

Du point de vue hydrique, le coefficient d'absorption capillaire était supérieur à la limite recommandée $20 \text{ g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ à 600°C ($31,29 \text{ g/cm}^2.\text{min}^{1/2}$ pour les BTCs stabilisés au ciment et $37,77 \text{ g/cm}^2.\text{min}^{1/2}$ pour les BTCs stabilisés à la chaux) Elles sont réputés être extrêmement fragiles ou très capillaire à l'eau au-delà de 600°C.

Du point de vue de la durabilité, toutes les BTCs stabilisées (ciment et à la chaux) ont un coefficient d'abrasion supérieur à $7 \text{ cm}^2/\text{g}$ et la perte de masse la plus faible après exposition à haute température (600°C). Donc, les BTCs stabilisées (ciment et à la chaux) résistent à l'usure après une température de 600°C. En ce qui concerne le test d'érodabilité, les BTCs stabilisées (ciment et à la chaux) sont résistantes à l'érosion à 600°C tandis qu'à 900°C et 1200°C, elles peu érodée.

À la suite de cette étude, les recommandations suivantes ont été formulées pour des recherches ultérieures :

- ✓ Il serait bénéfique d'effectuer une analyse chimique et minérale des BTCs stabilisés à 8% de ciment et 10 % de chaux à différentes températures afin de discuter plus efficacement des résultats.

Tenue à haute température des blocs en terre comprimées stabilisées au ciment et à la chaux.

- ✓ Étudier les temps de résistance et la vitesse de monté des BTCs à haute température afin de mieux comprendre l'usure à haute température.
- ✓ Réaliser une étude à grande échelle pour simuler l'impact de la température sur un mur ou un bâtiment construit en terre stabilisée au ciment, à la chaux ou au géopolymère.

Bibliographie

- [1] Tarmangue DIME: Détermination des paramètres de réactivité des matériaux argileux pour la production des briques en terre comprimée 2021.
- [2] YAO Franck Aimé: «Exploration du potentiel hygroscopique des briques de terre comprimée (BTC) pour l'amélioration du confort thermique de l'habitat en climat chaud.» 2019.
- [3] Jehanne PAULUS.: CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES – Application à un cas pratique : Ouagadougou. 2014.
- [4] SALASSI J. Simon–Pierre: Paramètres de conception et performances des briques en terre comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : Carrières argileuses de Kossodo et Saaba 2020.
- [5] Beckett, C.; Kazamias, K. and Law, A.: Investigations into the high temperature behaviour of unstabilised rammed earth, Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Presented at Kingston University, London, United Kingdom, 2019.
- [6] Akinshipe, O. and Kornelius, G.: Chemical and thermodynamic processes in clay brick firing technologies and associated atmospheric emissions metrics-a review, (2017).
- [7] Norme XP P 13-901 2017.
- [9] NF P 18-459, Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique, Mars, (2010).²
- [10] Hall, M. and Djerbib, Y.: Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency, Construction and building materials, **18** (2004), no. 4, pp. 281–286.
- [11] Nshimiyimana, P.: Effect of the type of clay earthen materials and substitution materials on the physico-mechanical properties and durability of compressed earth blocks, (2020).

- [12] Habibou OUEDRAOGO: Durabilité des blocs en terre comprimées stabilisées aux géopolymères 2022.
- [13] Teja, K.V.; Meena, T. and Reddy, A.N.: Investigation on metakaolin and silica fume incorporated concrete under elevated temperature, *IJCMS*, **7** (2018), p. 114.
- [14] Abdallah, R.I.; Perlot, C.; Carré, H.; La Borderie, C. and El Ghoche, H.: Fire Behavior of Raw Earth Bricks: Influence of Water Content and Cement Stabilization, *Construction Technologies and Architecture*, Trans Tech Publ, 2022, pp. 792–800.
- [15] Serge KONON: Propriétés d'usages et durabilités des Briques en Terre Comprimées stabilisées par les sous-produits agro-industriels : terre argileuse de Kamboinsé -Burkina Faso 2019.
- [16] Nshimiyimana, P.; Hema, C.; Sore, S.O.; Zoungrana, O.; Messan, A. and Courard, L.: DURABILITY PERFORMANCES OF COMPRESSED EARTH BLOCKS EXPOSED TO WETTING–DRYING CYCLES AND HIGH TEMPERATURE, *Eco-Architecture IX: Harmonisation between Architecture and Nature*, **210** (2022), p. 141.
- [17] Longhi, M.A.; Rodriguez, E.D.; Walkley, B.; Eckhard, D.; Zhang, Z.; Provis, J.L. and Kirchheim, A.P.: Metakaolin-based geopolymers: Efflorescence and its effect on microstructure and mechanical properties, *Ceramics International*, **48** (2022), no. 2, pp. 2212–2229.
- [18] Yong-Sing, N.; Yun-Ming, L.; Cheng-Yong, H.; Abdullah, M.M.A.B.; Pakawanit, P.; Chan, L.W.L.; Hui-Teng, N.; Shee-Ween, O.; Wan-En, O. and Yong-Jie, H.: Thin fly ash/ladle furnace slag geopolymer: Effect of elevated temperature exposure on flexural properties and morphological characteristics, *Ceramics International*, **48** (2022), no. 12, pp. 16562–16575.
- [19] Guillaud, H.; Doat, P.; Rollet, P.; Houben, H.; Garnier, P.; Fontaine, L.; Anger, R.; Joffroy, T.; Moriset, S. and Gandreau, D.: Technologie de construction et architecture de terre. Proposition de directions prioritaires de recherche pour la République de Corée: Rapport final (Volume 1/2) 2008.

ANNEXES



Écran de programmation du four



BTC à l'intérieur du four



Essai d'érodabilité



Essai Porosité accessible à l'eau



Essai Absorption capillaire



Essai de compression