



COMPORTEMENT PHYSICO-THERMIQUE ET HYGROSCOPIQUE DES ELEMENTS DE MAÇONNERIES: LES BTC, BLT, BETONS CELLULAIRES

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

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le 26 Juillet 2022 par

Pikiliwé TCHATCHOU (20180674)

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

Maître de stage : Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant chercheur, 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Yohan RICHARDSON

Membres et correcteurs : Dr Christian RAMADJI

M. Yawo Daniel ADUFU

Promotion [2021-2022]

DEDICACES

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

A LA MEMOIRE DE MONSIEUR CHRISTOPH WINNEMÖLLER

Aucune dédicace ne saurait exprimer ma reconnaissance, mon respect et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour ma scolarisation et mon bien être ;car sans vous tout ce document n'aurait vu le jour.

A MA CHERE MERE

Je vous remercie pour tout l'amour et le soutien incommensurable que vous me portez depuis mon enfance et je prie Dieu pour que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder la santé, le bonheur et une longue vie pour que vous soyez témoin de mon aboutissement.

A LA MEMOIRE DE MON CHER PERE

Ce travail est dédié à mon père, décédé trop tôt, qui a beaucoup participé à mon éducation et qui a été l'un des premiers à croire en moi.

J'espère que, du monde qui est le sien maintenant, tu apprécies cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui aurait voulu que tu partages ce moment avec lui. Puisse Dieu vous accorder sa miséricorde.

CITATION

« Savoir écouter, c'est posséder, outre le sien, le cerveau des autres. »

Léonardo Da Vinci

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce à la collaboration de certaines personnes dont j'ai bénéficié l'accompagnement, l'encouragement et surtout du soutien. C'est le lieu pour moi d'exprimer toute ma gratitude à ces nombreuses personnes, qui malgré leurs multiples occupations, n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter leur appui.

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 à qui je souhaite exprimer ma profonde gratitude. Merci de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et de m'avoir encadré tout au long de ce stage. Merci pour tous vos conseils, tant professionnellement qu'humainement ;
- Mon maître de stage, Docteur Philbert NSHIMIYIMANA, enseignant chercheur à 2iE qui m'a suivi tout au long de ce stage, Merci pour les nombreux conseils, votre accueil chaleureux et votre disponibilité.
- Tout le personnel du LEMHaD qui a participé au bon déroulement de ce stage en vue de la rédaction de mon mémoire de fins d'étude. Un grand merci à Mr Salifou KABORE pour son assistance et ses conseils ;
- L'ensemble du corps enseignant de 2iE pour les connaissances transmises au cours de ma formation du cycle d'ingénieur ;
- Mes parents pour leur soutien autant moral que financier ;
- Mes camarades de promotion ;
- A tous ceux qui de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre n'ont ménagé aucun effort pour l'accomplissement de ce travail.

RESUME

La dégradation de l'environnement constitue un problème majeur dans le secteur du génie-civil. De ce fait, l'utilisation de certains matériaux locaux comme les BTC, les BLT, les bétons cellulaires peut être valorisé dans la construction en vue de réduire considérablement l'impact négatif qu'a le secteur de la construction sur l'environnement, la consommation d'énergie ou encore la climatisation. Le travail présenté dans ce document vise à l'évaluation de l'influence de la stabilisation par les fibres végétales sur les performances physico thermiques et hygroscopiques des blocs de terre comprimés. L'évaluation des performances physico thermiques et hygroscopiques des bétons cellulaires avec des additifs comme la poudre d'aluminium, des Blocs latéritiques taillés de Bobo-Dioulasso et de Dano. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres dans les BTC, a provoqué une diminution de la densité apparente, entraînant une augmentation de la porosité et de l'absorption capillaire. Les résultats montrent aussi une diminution de la conductivité thermique et de la profondeur de pénétration des flux thermiques. L'incorporation de fibres dans les BTC a aussi provoqué une diminution de leur capacité d'absorption d'eau de 2,16 % à 1,61 % et du coefficient de résistance à la vapeur d'eau (31,9 – 19,4). Les BLT de Bobo-Dioulasso et de Dano ont respectivement une densité apparente de 2250 kg/m³ et 1773 kg/m³, une porosité de 23,5 % et 28,1 %. Les conductivités thermiques sont respectivement de 0,555 W/m.K et 0,723 W/m.K avec des profondeurs de pénétration de flux thermique de 0,075 m et 0,104 m. Les capacités d'absorption des BLT sont 1,95 % et 0,9 % pour des coefficients de résistance à la vapeur d'eau de 16,6 et 22,9. L'ajout de poudre d'aluminium et de sable granitique dans le béton cellulaire provoque une diminution de la densité apparente, de la conductivité thermique et de la profondeur de pénétration de flux thermiques. Par contre l'ajout de ces additifs fait augmenter la porosité et l'absorption capillaire des bétons cellulaires. La poudre d'aluminium et le sable granitique ont aussi une influence sur le pouvoir absorbant des bétons cellulaires et sur la résistance à la vapeur d'eau.

Mots clés

1. Brique en terre comprimé
2. Brique en latéritique taillée
3. Béton cellulaire
4. Propriétés thermiques
5. Propriétés hygroscopiques

ABSTRACT

Environmental degradation is a major problem in the civil engineering sector. Therefore, the use of some local materials such as BTC, BLT, cellular concretes can be valorized in the construction in order to reduce considerably the negative impact that the construction sector has on the environment, the energy consumption or the air conditioning. The work presented in this paper aims at evaluating the influence of stabilization by plant fibers on the physico-thermal and hygroscopic performances of compressed earth blocks, the physico-thermal and hygroscopic performances of cellular concretes with additives such as aluminum powder and cut lateritic blocks of Bobo-Dioulasso and Dano. The results showed that the addition of fibers in the BTC, caused a decrease of the apparent density, resulting in an increase of the porosity and capillary absorption. The results also show a decrease in the thermal conductivity and the depth of penetration of thermal flows. The incorporation of fibers in the CTBs also caused a decrease in their water absorption capacity from 2.16% to 1.61% and in the water vapor resistance coefficient (31.9 - 19.4). The Bobo-Dioulasso and Dano BLTs have a bulk density of 2250 kg/m³ and 1773 kg/m³ respectively, and a porosity of 23.5% and 28.1%. The thermal conductivities are respectively 0.555 W/m.K and 0.723 W/m.K with heat flux penetration depths of 0.075 m and 0.104 m. The absorption capacity of the BLTs are 1.95 % and 0.9 % for water vapour resistance coefficients of 16.6 and 22.9. The addition of aluminum powder and granitic sand in aerated concrete causes a decrease in bulk density, thermal conductivity and depth of heat flow penetration. On the other hand, the addition of these additives increases the porosity and capillary absorption of cellular concrete. Aluminum powder and granitic sand also have an influence on the absorbency of cellular concrete and on the resistance to water vapor.

Key words

1. Compressed earth brick
2. Cut laterite brick
3. Cellular concrete
4. Thermal properties
5. Hygroscopic properties

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

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

BTC : Brique en Terre Comprimée ;

BLT : Bloc Latéritique Taillé ;

BC : Béton Cellulaire ;

CO₂ : Dioxyde de Carbone ;

°C : degré Celsius ;

C : Chaleur spécifique (MJ/m³.K);

CCR : Résidus de Carbure de Calcium ;

CEB : Briques en terre comprimée

D : Diffusivité thermique (mm²/s) ;

HR : Humidité relative ;

°K : degré Kelvin ;

K : conductivité thermique (W/m.K);

LEMHaD : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable ;

RHA : Cendre de balle de riz

SOMMAIRE

DEDICACES	i
CITATION	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
INTRODUCTION GENERALE.....	5
Chapitre 1. SYNTHESSES BIBLIOGRAPHIQUES.....	7
1.1. Définition de quelques termes	7
1.1.1. Densité apparente	7
1.1.2. Absorption capillaire	7
1.2.3. Propriétés thermiques.....	7
1.2. Les briques en terre comprimée.....	9
1.2.1. Définition	9
1.2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC.....	9
1.3. Les blocs latéritiques taillés.....	11
1.4. Bétons cellulaires.....	11
1.5. Performances physico-thermiques et hygroscopiques de matériaux.....	12
Chapitre 2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	16
2.1. Matériaux.....	16
2.1.1. Briques en terre comprimées.....	16
2.1.2. Blocs latéritiques taillés	16
2.1.3. Les bétons cellulaires	16
2.2. Méthodes expérimentales	17
2.2.1. Détermination des propriétés physiques	17
2.2.2. Propriétés thermiques	18
2.2.3. Propriétés hygroscopiques.....	19
Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	25

3.1. Propriétés physiques	25
3.1.1. Densité apparente et porosité	25
3.1.2. Absorption d'eau par immersion.....	27
3.2. Propriétés thermiques	31
3.2.1. Conductivité thermique.....	31
3.2.2. Effusivité thermique.....	32
3.2.2. Capacité thermique spécifique	33
3.2.2. Diffusivité thermique	34
3.2.3. Profondeur de pénétration du flux thermique δp	35
3.3. Propriétés hygroscopiques	37
3.3.1. Sorption – désorption	37
3.3.2. Perméabilité à la vapeur	40
3.3.3. Coefficient de résistance à la vapeur d'eau.....	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	42
BIBLIOGRAPHIE	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Composition du matériau (Nshimiyimana et al, 2020b)	9
Tableau 2.1. Humidité relative produite.....	20
Tableau 3.1. Tableau récapitulatif des coefficients de sorptivité des différents matériaux	30
Tableau 3.2. Pourcentage de sorption des éléments de maçonnerie	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Diagramme de texture [5]	10
Figure 1.2. Diagramme de plasticité [5]	10
Figure 1.3. Composition du béton cellulaire (Mémento technico-économique du béton cellulaire) [8]	11
Figure 1.4. L'évolution de la teneur en eau des cinq briques Cagnon et al [9]	12
Figure 1.5. Evolution de la conductivité thermique des briques de terre en fonction de la teneur en ciment. Saidi et al [11].....	14
Figure 1.6. Isothermes de sorption (Nshimiyimana) [2]	15
Figure 2.1. Dispositif d'essai d'absorption capillaire.....	18
Figure 2.2. Dispositif expérimental de l'essai de perméabilité à la vapeur	23
Figure 3.1. Densités apparentes et porosité des BTC.....	25
Figure 3.2. Densités apparentes et porosité des BLT	25
Figure 3.3. Densités apparentes et porosité des bétons cellulaires.....	26
Figure 3.4. Absorption d'eau par immersion capillaire des BTC	27
Figure 3.5. Absorption d'eau par immersion capillaire des BLT	27
Figure 3.6. Absorption d'eau par immersion capillaire des bétons cellulaires avec sable de rivière et poudre d'aluminium	28
Figure 3.7. Absorption d'eau par immersion capillaire des bétons cellulaires avec sable granitique et poudre d'aluminium.....	28
Figure 3.8. Conductivité thermique des maçonneries	31
Figure 3.9. Effusivité thermique des éléments de maçonnerie.....	32
Figure 3.10. Capacité thermique spécifique des éléments de maçonnerie.....	33
Figure 3.11. Diffusivité thermique des éléments de maçonnerie	34
Figure 3.12. Profondeur de pénétration du flux thermique des BTC et BLT	35
Figure 3.13. Profondeur de pénétration du flux thermique des bétons cellulaires.....	36
Figure 3.14. Courbes de sorption des BTC	37
Figure 3.15. Courbes de sorption des BLT	37
Figure 3.16. Courbes de sorption des bétons cellulaires	38
Figure 3.17. Perméabilité à la vapeur d'eau des maçonneries	40
Figure 3.18. Coefficient de résistance à la vapeur des maçonneries	41

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du bâtiment et de la construction ont d'importantes répercussions sur l'environnement du fait de leur forte consommation des ressources à savoir : sol, matériaux, énergie, eau etc. sur le niveau des émissions (gaz à effet de serre, particules, déchets) et sur le niveau de pollution. En 2015, le secteur de la construction et de l'exploitation des bâtiments étaient responsables de 38 % (13,1 gigatonnes) des émissions mondiales de dioxydes de carbone (CO₂) liées à l'énergie [1]. Aussi, la consommation d'énergie pour la construction et l'exploitation des bâtiments a totalisé 144 exajoules, soit 38 % de la demande mondiale [1]. Avec la croissance de la population et du pouvoir d'achat dans les pays en développement, l'augmentation de la surface des bâtiments, pourrait mener à une augmentation de la demande d'énergie des bâtiments de 50 % d'ici 2050 [1].

En effet, l'impact des bâtiments sur l'environnement est tel que les techniques de construction ont été revu depuis plusieurs années afin d'aller vers des bâtiments plus écologiques. Au Burkina-Faso par exemple, on peut citer l'utilisation des briques en terre comprimée stabilisée (BTCs), les briques de latérite taillées (BLT) et des bétons cellulaires qui sont des matériaux qui présentent plusieurs avantages du point de vue impact environnemental [2]. Néanmoins, les études de caractérisations pour une utilisation plus efficiente de ces matériaux se sont principalement concentrées sur leurs comportements physico-mécaniques, et très peu sur leurs comportements physico-thermiques et hygroscopiques [2]. Il convient donc de maîtriser également ces derniers aspects pour une meilleure utilisation, en vue de concevoir des habitats avec un confort hygrothermique adapté au climat du Burkina Faso, et pouvant éventuellement aboutir à une diminution des consommations d'énergie dans l'habitat.

C'est dans cette perspective qu'une étude a été menée sur le comportement physico-thermique et hygroscopique des éléments de maçonnerie en particulier les Briques en terre comprimée stabilisée avec des fibres végétales de chiendent, les blocs latéritiques de Bobo Dioulasso et de Dano, les bétons cellulaires à base de sable de rivière et de poudre d'aluminium, les bétons cellulaires à base de sable granitique et poudre d'aluminium.

L'objectif de la présente étude est la contribution à la caractérisation du comportement physico-thermique et hygroscopique de ces éléments de maçonnerie. Spécifiquement, ce travail de recherche consiste à :

- ❖ Déterminer les propriétés thermiques des éléments de maçonneries
- ❖ Déterminer les courbes de sorption-désorption des éléments de maçonneries
- ❖ Déterminer la perméabilité à la vapeur des éléments de maçonneries

Chapitre 1. SYNTHES BIBLIOGRAPHIQUES

Dans le but d'atteindre les résultats attendus, de maîtriser les différents essais à réaliser, ainsi que la capacité à pouvoir analyser et interpréter les résultats de la présente étude, une recherche bibliographique a été menée et a conduit à la consultation de quelques documents.

Dans le présent chapitre, il est question de définir quelques termes relatifs aux propriétés physiques et thermiques de matériaux, de présenter les principaux matériaux faisant l'objet d'étude dans ce mémoire ; à savoir : la brique en terre comprimée stabilisée, les blocs latéritiques taillés, les bétons cellulaires et terminer par la présentation de quelques travaux antérieurs portant sur les performances physico-thermiques et hygroscoPIques de différents éléments de maçonnerie.

1.1. Définition de quelques termes

1.1.1. Densité apparente

La densité apparente est une grandeur utilisée dans le BTP, afin de rendre compte de la masse du matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel.

1.1.2. Absorption capillaire

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

L'absorption par capillarité est une propriété hydrique qui témoigne de la capacité d'un matériau à absorber une quantité d'eau par unité de temps et de surface, lorsqu'une seule face est en contact direct avec de l'eau. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est obtenue expérimentalement pour les matériaux utilisés en tant qu'éléments de maçonnerie selon la norme XP 13-901 [3].

1.2.3. Propriétés thermiques

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au système le plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Dans le cas d'une habitation en terre, les deux systèmes mis en contact par le biais du mur en terre sont le milieu extérieur et intérieur de l'habitation. Le sens de déplacement du flux thermique dépendra donc de la différence de température entre les deux milieux.

En effet, limiter la dépendance énergétique tout en améliorant le confort thermique dans une habitation est très majeur. Si cela peut dépendre de l'architecture et de l'orientation de l'ouvrage, la contribution des propriétés thermiques du matériau n'est pas négligeable. Par propriétés thermiques, l'on entend, la conductivité thermique, l'effusivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique. Toutes ces propriétés ont été mesurées et calculées à travers un essai d'acquisition thermique à plan chaud et à régime transitoire.

1.2.3.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique λ , se définit comme l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur par unité de largeur et par degré de différence de température ($W/m.^{\circ}C$). Elle dépend essentiellement de la porosité du matériau et donc indirectement de sa densité. Les matériaux poreux donc moins denses sont naturellement moins conducteurs que les matériaux denses [4].

1.2.3.2. L'effusivité thermique

L'effusivité thermique (b) exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique. Elle rend compte de la capacité de stockage thermique d'une paroi. L'effusivité thermique évolue dans le même sens que la conductivité thermique λ [4]. Mais un matériau absorbe d'autant plus facilement la puissance thermique que sa température s'élève peu sous l'effet de la chaleur (chaleur volumique élevée).

1.2.3.3. Capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau notée c indique la quantité de chaleur à fournir à $1m^3$ de ce matériau pour élever sa température de $1^{\circ}K$. Ainsi on parle de capacité thermique volumique. Elle peut être ramenée par unité de masse en la multipliant par la masse volumique apparente du matériau. Dans ce cas on parlera plutôt de la capacité thermique massique [4].

1.2.3.4. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique commande la vitesse de transmission d'une variation de température à travers une paroi. La température du matériau s'élève d'autant plus rapidement que la chaleur peut plus facilement l'atteindre (conductivité élevée). Elle évolue donc dans le même sens que la conductivité thermique. Mais sous l'effet d'une puissance thermique, la température d'un matériau s'élève d'autant plus lentement qu'il faut beaucoup plus de chaleur pour l'élever (chaleur volumique élevée). La diffusivité thermique évolue dans le sens inverse de la chaleur volumique. Elle est très liée au phénomène de déphasage à travers les parois qui est inversement proportionnel à la diffusivité thermique [4].

1.2.3.5. Profondeur de pénétration de flux thermiques

La profondeur de pénétration de flux thermique correspond à l'épaisseur de matériau sollicitée par la variation de température pendant une période donnée, en général 24 heures [4].

1.2. Les briques en terre comprimée

1.2.1. 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 des blocs de terre moulée est pourtant ancienne et c'est à l'aide de pilons en bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. C'est dans les années 70 et 80 qu'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées ont vu le jour pour le développement considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée [5].

1.2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des BTC

1.2.2.1. La latérite

Pour une bonne qualité des BTC, il est convenable de choisir une bonne terre répondant à certaines normes notamment celles définies par CRA Terre. Pour la granularité des latérites utilisés dans la fabrication des BTC, la norme ARS-680 recommande des terres dont la texture s'inscrit dans le fuseau du diagramme des textures présenté dans la figure 1.1 [5]. En effet, toutes les terres ne sont pas appropriées pour la fabrication des BTC. Le tableau 1.1 nous montre quelques guides pour un bon choix de terre :

Tableau 1.1. Composition du matériau (Nshimiyimana et al, 2020b)

Sable	25 à 80 %
Limon	10 à 25 %
Argile	8 à 30 %

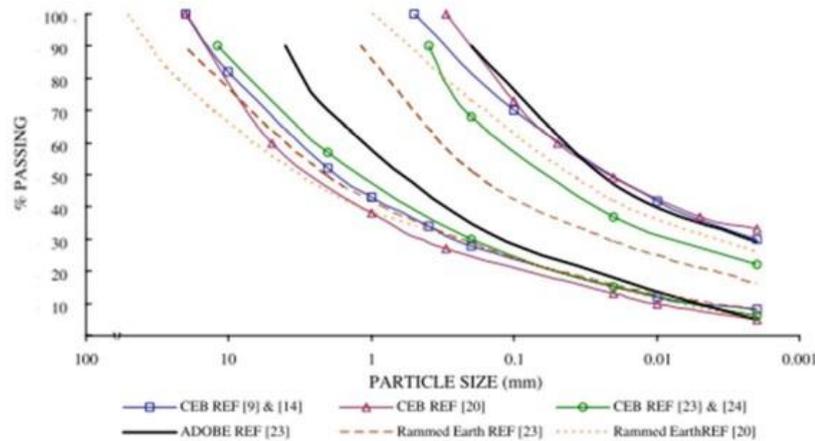


Figure 1.1. Diagramme de texture [5]

Aussi, pour la plasticité des terres, elle sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité défini par la norme ARS-680 [5]. (Figure 1.2)

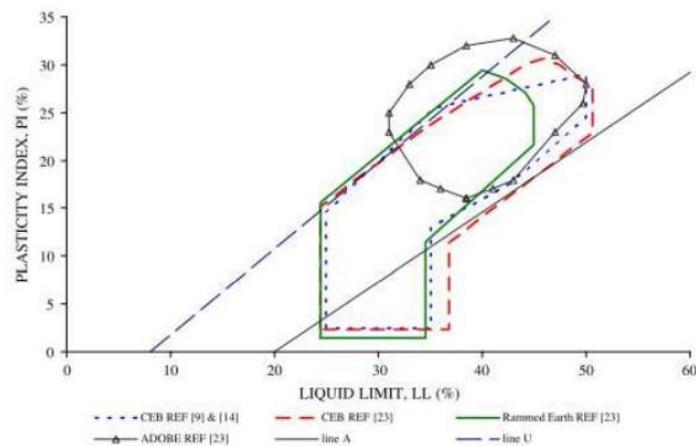


Figure 1.2. Diagramme de plasticité [5]

Outre la bonne sélection des latérites utilisées dans la fabrication des BTC, on a recours à la stabilisation de la terre dans l'optique d'améliorer les caractéristiques mécaniques, physiques et aussi les paramètres de durabilité des BTC [2]. Cette stabilisation peut s'effectuer avec des liants hydrauliques comme : la chaux éteinte, le ciment Portland à plusieurs pourcentages (5 %, 10 %, 20 %), avec des fibres végétales (0 %, 0,2 %, 0,4 %, 0,8 %, 1,2 %) [2] en fonction des caractéristiques recherchées. **SORE et al** [6] ont mené des études sur les BTC stabilisées aux liants géopolymère avec un taux allant de 5 % à 20 % et ont obtenu des résistances en compression sèche de 2,81 à 8,95 MPa alors que la résistance en compression de la BTC non

stabilisée était seulement de 1,36 MPa. **Nshimiyimana et al** [2] , ont obtenu des résistances à la compression de 3,4 MPa sur des BTC stabilisés avec 8 % de CCR.

1.3. Les blocs latéritiques taillés

La latérite couvre environ 33 % des continents et est très utilisée dans les pays tropicaux comme matériau de maçonnerie et comme pavé. Les BLT ont des performances variables selon leur carrière et leur position d'extraction [7].

Des études sur les performances des blocs latéritiques taillés de la carrière de Dano montrent que les résistances mécaniques sont comprises entre 0,92 et 5,92 MPa [7]. Suivant la profondeur d'extraction, la couche superficielle donne de meilleurs résultats de résistance mécanique.

1.4. Bétons cellulaires

Le béton cellulaire est un produit silico-calcaire autoclavé, constitué uniquement de matériaux minéraux : sable (65 %), ciment (20 %), chaux (15 %), gypse (1 %), agent d'expansion (0,05 %) [8] .

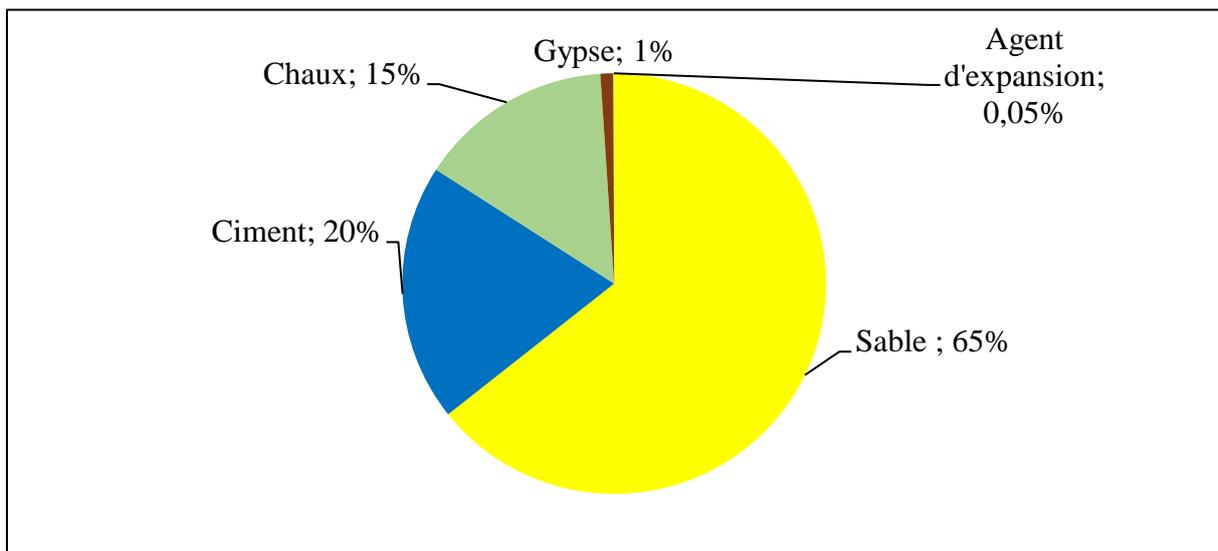


Figure 1.3. Composition du béton cellulaire (Mémento technico-économique du béton cellulaire) [8]

Outre ses qualités mécaniques de matériau porteur, le béton cellulaire présente d'excellentes performances thermiques par sa faible conductivité thermique et par une correction efficace des ponts thermiques. Parallèlement, par sa nature isotrope et sa pose à joints minces, il permet une très bonne maîtrise de l'étanchéité à l'air [8] .

Grâce à ses performances physiques et économiques et à son excellent comportement au feu, le béton cellulaire répond aux enjeux de réhabilitations et de requalifications énergétiques. De par

sa nature incombustible, il est aussi utilisé dans la réalisation de murs coupe-feu autant en mur extérieur qu'en murs séparatifs [8].

1.5. Performances physico-thermiques et hygroscopiques de matériaux

Cagnon et al [9] ont mené des études sur cinq échantillons de briques de terre. Pour les essais en laboratoire, ils ont préparé différents types d'échantillons à savoir : $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$ pour tester la perméabilité à la vapeur d'eau, $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ pour mesurer la conductivité thermique par la méthode de la plaque chauffante gardée, $60 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$ pour mesurer l'effusivité et la conductivité thermique par la méthode de la plaque chauffante asymétrique et $60 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ pour la mesure de la capacité thermique. La densité sèche apparente a été mesurée sur des spécimens utilisés pour les isothermes de sorption ($60 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$) séchés à un poids constant dans un four à 50 °C (Environ 7 % d'humidité relative), le poids est jugé stable quand la variation entre deux pesées successives espacées de 24h est inférieure à 0,1 %. Les résultats des densités sèches des cinq briques, étaient comparables et (comprises entre $2,02$ et $2,07 \text{ g.cm}^{-3}$) sauf pour la brique 4, qui avait une densité sèche beaucoup plus faible ($1,94 \text{ g.cm}^{-3}$). Pour les isothermes de sorption et désorption, ils ont observé l'évolution de la teneur en eau des cinq briques soumises à une humidité relative croissante pendant un essai de sorption de la vapeur d'eau avec la méthode des solutions saturées (figure 1.4).

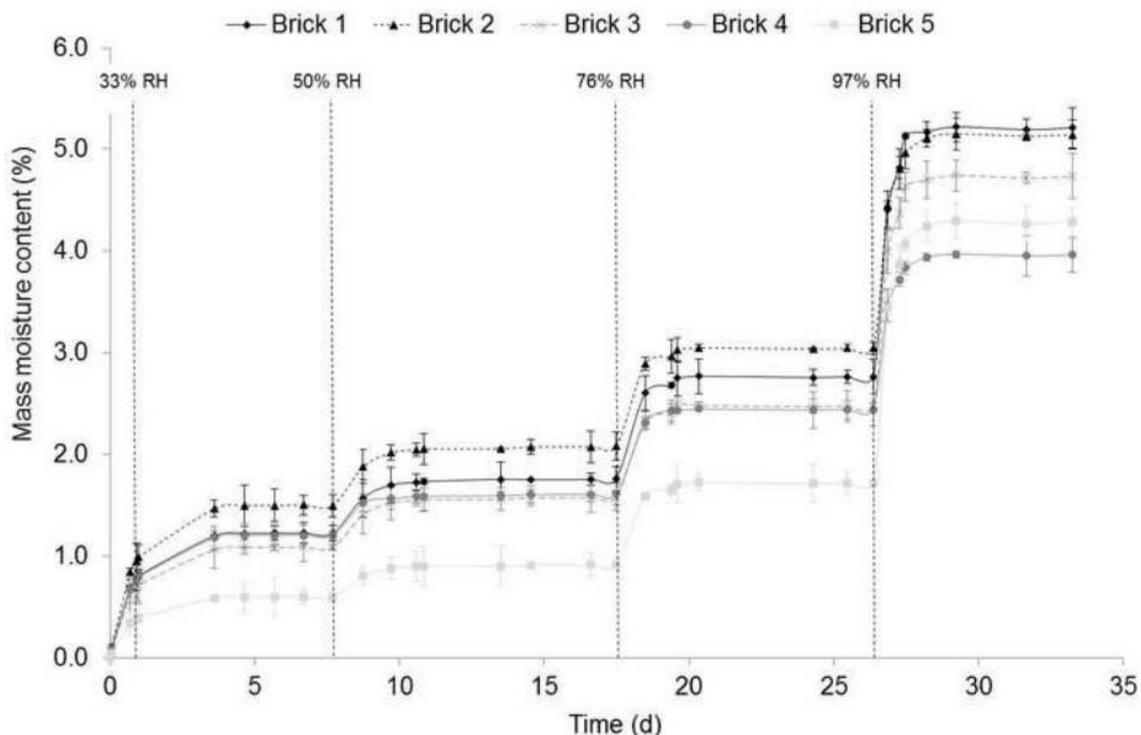


Figure 1.4. L'évolution de la teneur en eau des cinq briques Cagnon et al [9]

Leur travail a aussi montré que les cinq briques de terre étudiées ont une très faible résistance à la vapeur d'eau. La valeur de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau de la coupe sèche était toujours plus élevée (7 à 19) que celle obtenue sur la coupe humide (3 à 7). malgré leur densité élevée corrélée avec leur comportement mécanique porteur, les briques de terre présentent une très faible résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Ces briques sont beaucoup plus perméables que le béton ou les pierres calcaires et leur perméabilité à la vapeur d'eau est similaire à celle des matériaux de construction poreux tels que le béton de bois, le béton cellulaire ou le plâtre. Aussi, Les valeurs de capacité thermique des cinq briques étaient très proches les unes des autres et ne variaient que de 900 à 960 J.kg⁻¹.K⁻¹. Les cinq briques de terre présentent aussi une effusivité thermique élevée, ce qui leur confère une inertie thermique élevée favorable au confort thermique et à l'efficacité énergétique des bâtiments. Comme c'est le cas pour les briques cuites, les briques de terre possèdent à la fois une forte inertie thermique et une faible résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Elles combinent les qualités d'une effusivité thermique élevée et d'une faible résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. Dans la même lancée.

Touré et al [10] pour leur études, ont fabriqué des échantillons de brique avec de la latérite, du sable et du ciment. La valeur la plus élevée de la conductivité thermique est ($k = 0.85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et la plus faible ($k = 0.66 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Malgré leur composition différente, les valeurs de conductivité thermique sont proches ($0,66 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} < k < 0,85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). La conductivité thermique moyenne des briques est de $0,75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ avec un coefficient de variation de 8%. Aussi, malgré la composition différente des briques de terre comprimée stabilisée, les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la vapeur d'eau sont très proches les unes des autres, allant seulement de 2.5 à $2.9 \cdot 10^{-11} \text{ kg m}^{-1} \text{ s-Pa}^{-1}$ et 7 - 8 respectivement.

Saidi et al [11] ont effectué des études sur des briques fabriquées avec un sable prélevé dans la région de Sidi Amor à l'Ariana (Tunisie) et stabilisé avec du ciment Portland ordinaire (CEM II A-L 32.5 N) et de la chaux hydratée à haute teneur en calcium (CL 90-S) avec les ratios allant de 5% à 12% par poids sec de l'échantillon. Les résultats de leurs études montrent que la conductivité thermique des briques terre-ciment dépend de la teneur en ciment et augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. Les valeurs de la conductivité thermique des blocs sont : 0.7983, 0.8014, 0.9639, 1.0776 et 1.1 W/m.K, pour des teneurs respectifs en ciment de 0 %, 5 %, 8 %, 10 % et 12 % . Aussi, la conductivité thermique des briques de terre évolue en fonction de la teneur en chaux. Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage de

chaux de 0 % à 12 % provoque une augmentation de la conductivité thermique des briques terre-chaux. La conductivité thermique du sol stabilisé se trouve dans la gamme de 0.7902 - 0.9785 W.m.K pour la variation de la teneur en chaux de 5 % à 12 % . On peut également remarquer que les blocs de sol stabilisés à la chaux ont montré des valeurs inférieures pour la conductivité thermique à celles des blocs de terre cimentée. En général, l'augmentation de la teneur en stabilisateurs dans le mélange augmente la conductivité thermique des briques de terre comprimées. Par conséquent, l'augmentation de la teneur en stabilisant accroît le flux de chaleur en augmentant leur conductivité thermique. La stabilisation a considérablement réduit la capacité de sorption d'humidité de la brique de terre comprimée, Les principaux résultats indiquent que le matériau de terre non stabilisé possède les meilleures caractéristiques thermiques et hygroscopiques parmi les matériaux de terre. L'ajout de stabilisateurs chimiques améliore le transfert de chaleur à travers les matériaux de terre et réduit leur perméabilité à la vapeur d'eau.

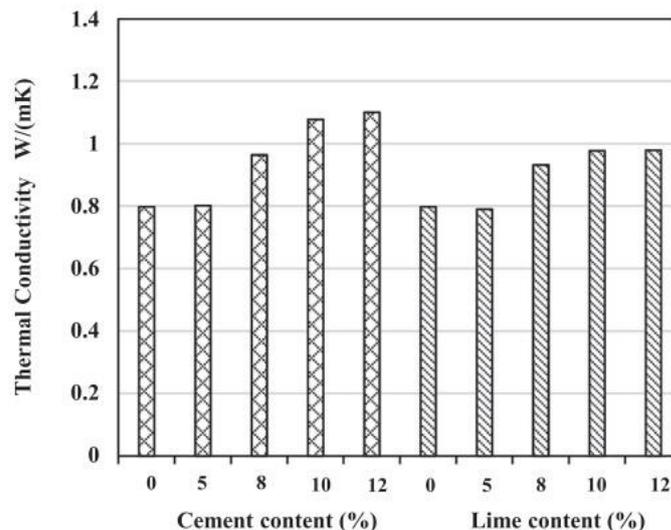


Figure 1.5. Evolution de la conductivité thermique des briques de terre en fonction de la teneur en ciment. Saïdi et al [11]

Nshimiyimana et al [2] , ont aussi mené des études similaires sur les BTC stabilisés avec du CCR et du RHA. De leur étude, il en ressort que, les blocs de terre comprimés stabilisés avec 10 et 20 % de Résidu de carbure de calcium ont des isothermes similaires à ceux des blocs de terre comprimés non stabilisés (0 % CCR) (figure 1.6 a).Par contre, Les blocs de terre comprimés stabilisés avec du CCR:RHA ont enregistré la sorption la plus élevée, dans la

gamme de 3,53 ;9 %, marquant une nette différence par rapport aux CEB stabilisées avec du CCR ou du ciment (figure 1.6 b).

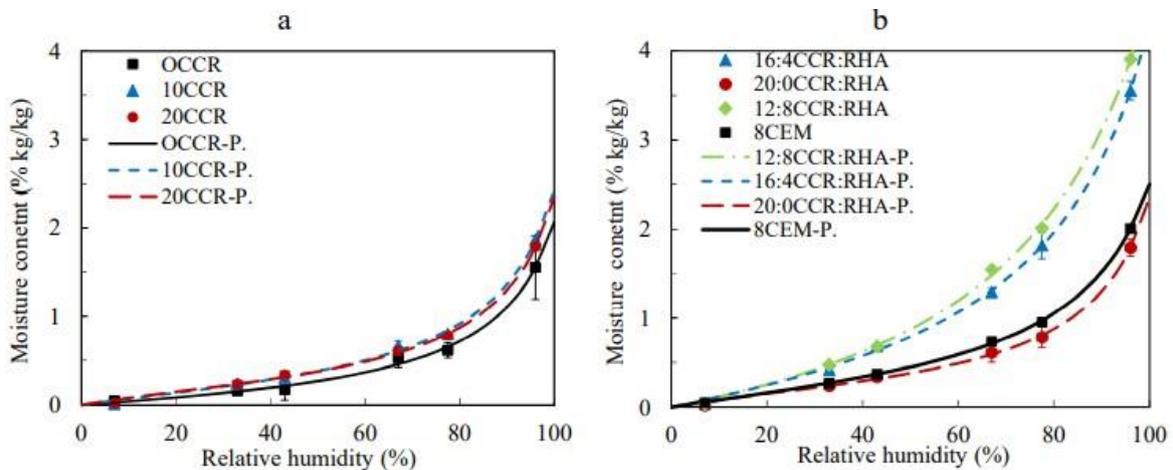


Figure 1.6. Isothermes de sorption (Nshimiyimana) [2]

Dans la présente étude, les courbes de sorption des CEBs stabilisés par CCR ont montré la même évolution que les CEBs non stabilisés. De même, la substitution du CCR par le RHA a entraîné une augmentation remarquable de la capacité de sorption des CEBs contrairement à d'autres études qui ont affirmé que la stabilisation, avec du ciment ou de la chaux, réduit la sorption.

Habsya et al [12] ont étudié l'effet de la teneur en cendres volantes sur la densité, la conductivité thermique, la résistance à la compression et l'absorption d'eau du béton mousse léger composé de ciment, sable, eau, cendres volantes et de mousses avec un rapport eau-ciment de 1:1 et un rapport eau-agrégat de 1:4 les quantités de sable et de cendres volantes variant de 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, en poids. Le contenu de la mousse de 30 %, 40 % du volume du mortier. Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur en cendre volante augmente la densité de 1346,25 kg/m³ à 1524,345 kg/m³ pour un ratio de 0 % et 30 % de cendre volante et 30 % de mousse, de 1346,25 kg/m³ à 1524,345 kg/m³ pour un ratio de 0 % et 30 % de cendre volante et 40 % de mousse. Aussi la conductivité thermique augmente de 0,086 W/m.K à 0,090 W/m.K pour un ratio de 0 % et 30 % de cendre volante et 30 % de mousse, de 0,0842 W/m.K à 0,0875 W/m.K pour un ratio de 0 % et 30 % de cendre volante et 40 % de mousse. Cependant l'absorption diminue de 16,30 % à 14,77 % pour un ratio de 0 % et 30 % de cendre volante et 30 % de mousse.

Chapitre 2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1. Matériaux

2.1.1. Briques en terre comprimées

Les matières premières utilisées pour la fabrication des BTC qui font l'objet de la présente étude sont essentiellement : de l'argile provenant de Zogbodomey (localité située au sud du Bénin à environ 112 km de Cotonou), du concassé 0/5 issu d'un site de concassage à Cotonou, de la paille de chiendent (mauvaise herbe présente sur les sols cultivables prélevées sur le campus d'Abomey-Calavi au Bénin.), du ciment Portland CEM II de la Société LaFarge au Bénin et de l'eau. Un mélange de 60% d'argile et 40% de concassé a été utilisé comme matrice. A cette matrice, 8% de ciment ont été ajoutés pour la stabilisation chimique des BTC de même que 0 à 1,5% de pailles de chiendent broyé. Les éprouvettes contenant différents teneurs de paille de chiendent ont été confectionnées et nommées BTC 0 %, BTC 0,5 %, BTC 1 %, BTC 1,5 % respectivement pour des teneurs en pailles de chiendent de 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 %. Aussi, la quantité d'eau ajoutée au mélange change en fonction de la teneur en paille du mélange dans le but de compenser l'eau absorbée par les pailles de chiendent 11,5% (BTC-0), 12,45% (BTC-0,5), 13,42% (BTC-1), 14,38% (BTC-1,5%).

2.1.2. Blocs latéritiques taillés

Les blocs latéritiques taillés utilisés pour cette étude sont issus des carrières de Bobo-Dioulasso et de Dano au Burkina-Faso. Les blocs ont été prélevés manuellement et les essais ont été effectués sur les échantillons intacts sans ajout d'autres constituants ou de stabilisants.

2.1.3. Les bétons cellulaires

Les matières premières utilisées pour la fabrication des bétons cellulaires sont essentiellement le ciment, le sable de rivière, de la poudre d'aluminium qui est un produit industriel avec une granulométrie inférieure à 45 μm composée de particules poreuses débouchantes et de particules poreuses non débouchantes à différentes proportions 0 %, 0,5 % et 1 % nommés respectivement BCN 0 %, BCN 0,5 %, BCN 1 %. Une autre matrice contenant des résidus de concassé de granite et de la poudre d'aluminium à des proportions 0 %, 0,5 % et 1 % nommés respectivement BCG 0 %, BCG 0,5 %, BCG 1 %. Pour chaque formulation le rapport eau/ciment est de 0,8 avec un dosage en ciment de 250 kg/m^3

2.2. Méthodes expérimentales

2.2.1. Détermination des propriétés physiques

2.2.1.1. Densité apparente et porosité

Pour déterminer la densité apparente (ρ_d) en kg/m^3 des éléments de maçonnerie secs de masse M_d en kg, les essais de caractérisation ont été effectués sur au moins trois spécimens afin de prendre en compte les valeurs moyennes et l'écart-type. Les calculs ont été faits à l'aide de l'équation (2.1) après un pesage hydraulique [2]. $M_{\text{sat.eau}}$ (kg) et $M_{\text{sat.air}}$ (kg) sont les masses des éléments de maçonnerie après 24h d'immersion, respectivement pesées dans l'eau et dans l'air et ρ_{eau} (1000 kg/m^3) est la densité de l'eau.

La porosité totale, $n(\%)$, qui est l'ensemble des vides d'un matériau a été estimée en utilisant l'équation (2.2).

$$\rho_d = \frac{M_d * \rho_{\text{eau}}}{M_{\text{sat.air}} - M_{\text{sat.eau}}} \quad (2.1)$$

$$n = 100 \frac{(M_{\text{sat air}} - M_{\text{initiale}})}{M_{\text{sat air}} - M_{\text{sat.eau}}} \quad (2.2)$$

2.2.1.2. Absorption capillaire et capacité d'absorption d'eau (Normes ARS 674)

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

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

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

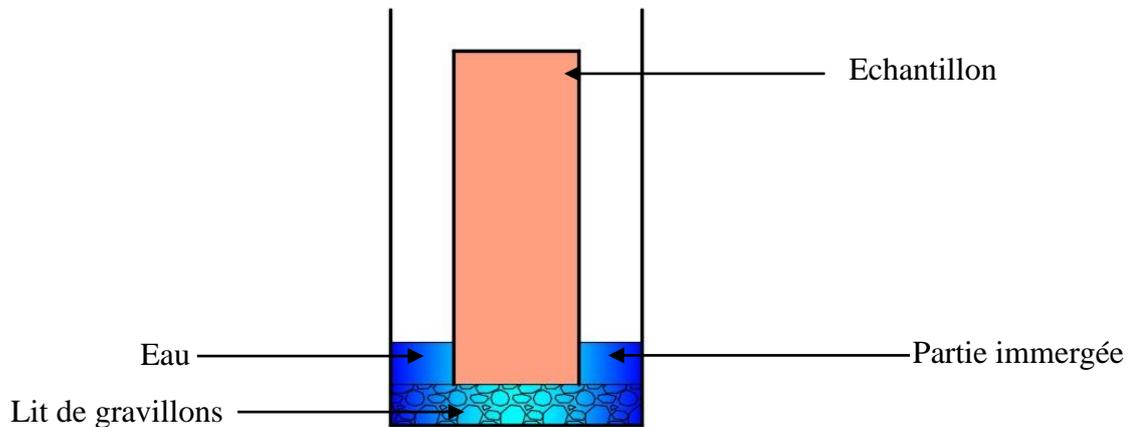


Figure 2.1. Dispositif d'essai d'absorption capillaire

Le coefficient d'absorption d'eau capillaire des blocs à 10 min est donné par l'équation :

$$C_{ab} = \frac{M_{10} - M_i}{S} \quad (2.3)$$

Avec :

- (M_{10}) : masse d'eau absorbée par le bloc au lors de l'essai à 10 min; exprimée en g ;
- S : surface spécifique de la partie immergée ; exprimée en cm^2 ;
- C_{ab} : Coefficient d'absorption capillaire
- M_i : Masse initiale ;

2.2.2. Propriétés thermiques

- La conductivité thermique est liée à l'effusivité thermique et à la capacité thermique volumique par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{b^2}{c_v} \quad (2.4)$$

avec

b : l'effusivité thermique

c_v : la capacité thermique volumique

- L'effusivité thermique est également déterminée par mesure en utilisant un DEsProTherm "dispositif d'estimation des propriétés thermiques" en conditions sèches.

L'effusivité thermique, b ($J/m^2K.S^{1/2}$), a été mesurée sur un échantillon de taille $6x4x3$ cm^3) qui ne permet pas au flux thermique de traverser l'éprouvette.

- La capacité thermique volumétrique, Cap ($J/m^3.K$) a été mesurée sur un échantillon de taille ($6x4x1cm^3$) qui permet au flux de traverser à travers le spécimen avec un DEsProTherm "dispositif d'estimation des propriétés thermiques"

- La diffusivité thermique est déterminée par la formule :

$$a = \frac{\lambda}{c_v} \quad (2.5)$$

avec ;

λ : la conductivité thermique

C_v : la capacité thermique volumique

- La profondeur de pénétration du flux thermique δ_p (m) est déterminée par l'équation :

$$\delta_p = \sqrt{\frac{a * T}{\pi}} \quad (2.6)$$

avec ;

a : la diffusivité thermique (m^2/s) ;

T : la période de variation harmonique du signal thermique (86400 s)

2.2.3. Propriétés hygroscopiques

2.1.3.1. Isothermes de sorption - désorption

Les spécimens sont séchés jusqu'à obtenir une masse constante. Tout en maintenant une température constante, on place les échantillons consécutivement dans une série d'environnements d'essai, avec une humidité relative augmentant par paliers (Tableau 2.1). La teneur en humidité est déterminée lorsque l'équilibre avec chaque environnement est atteint. L'équilibre avec l'environnement est établi en pesant le spécimen jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte (la différence de masse entre deux pesées consécutives espacées de 24H doit être inférieure à 0,1 %). Un minimum de quatre atmosphères d'essai doit être sélectionné dans la gamme d'humidité considérée [13].

Après avoir établi la teneur en humidité absorbée par l'échantillon à chaque humidité relative, la courbe d'adsorption peut être tracée.

Tableau 2.1. Humidité relative produite

Solution	Humidité relative
Oxyde de potassium (KOH)	9%
Chlorure de magnésium hydraté (MgCl ₆ H ₂ O)	33%
Carbonate de potassium (K ₂ CO ₃)	43%
Iodure de potassium KI	69%
Chlorure de sodium (NaCl)	75%
Chlorure de potassium (KCl)	83%
Dichromate de potassium (K ₂ Cr ₂ O ₄)	97%

Le point de départ de la désorption est une humidité relative d'au moins 95 %. Il peut s'agir du dernier point de la courbe d'absorption ou peut être atteint par absorption à partir d'une éprouvette séchée. Tout en maintenant une température constante, l'échantillon est placé consécutivement dans une série d'environnements d'essai, avec une humidité relative décroissante. L'humidité relative diminuant par étapes, la teneur en humidité est déterminée lorsque l'équilibre avec chaque environnement est atteint. L'équilibre avec l'environnement est établi en pesant le spécimen jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte. Au minimum de quatre atmosphères d'essai doivent être sélectionnées dans la gamme d'humidité considérée.

Enfin, le spécimen est séché jusqu'à obtention d'une masse constante.

Après avoir établi la teneur en humidité à chaque humidité relative, la courbe de désorption peut être dessinée.

L'appareillage d'essai doit comprendre :

- des coupelles de pesée n'absorbant pas l'eau et munies de couvercles hermétiques ;
- une balance capable de peser avec une précision de $\pm 0,01$ % de la masse de l'échantillon d'essai ;
- une étuve, conforme à la norme EN ISO 12570 ;
- un dessiccateur, capable de maintenir l'humidité relative à ± 2 % ;
- une chambre à température constante, capable de maintenir la température d'essai spécifiée avec une précision de $\pm 0,5$ K.

Un spécimen d'essai doit être représentatif du produit et avoir une masse d'au moins 10 g.

Les spécimens de matériaux dont la densité à sec est inférieure à 300 kg/m³ doivent avoir une surface d'au moins 100 mm x 100 mm.

Procéder à la préparation de la solution aqueuse saturée appropriée pour atteindre l'humidité relative nécessaire dans le dessiccateur. Placer le dessiccateur dans la chambre à température constante.

Pour l'essai de sorption, il faut mettre l'éprouvette, si nécessaire dans la coupelle de pesée, dans l'étuve et la sécher jusqu'à ce qu'une masse constante à la température spécifiée dans la norme EN ISO 12570 soit atteinte. La masse constante est atteinte si le changement de masse entre deux pesées consécutives, espacées chacune d'au moins 24 heures, est inférieur à 0,1 % de la masse totale. Placer l'éprouvette dans l'enceinte climatique. Au début, l'humidité dans l'enceinte climatique est la plus basse de la gamme de valeurs choisie pour l'essai. Peser périodiquement l'éprouvette dans l'enceinte climatique jusqu'à ce qu'elle soit en équilibre avec l'environnement (masse constante). Répéter la procédure pour des humidités croissantes. Un minimum de quatre humidités approximativement dans un ordre croissant, dans une fourchette allant de 30 % à 95 % d'humidité relative.

Pour la désorption, le point de départ se situe à une humidité relative d'au moins 95 %. Il peut s'agir du dernier point de la courbe d'absorption ou peut être atteint par absorption à partir d'une éprouvette séchée. Placer l'éprouvette, si nécessaire sur la coupelle de pesée, dans l'enceinte climatique. Peser périodiquement l'échantillon dans l'enceinte climatique jusqu'à ce qu'il soit en équilibre avec l'environnement (masse constante). La masse constante est atteinte si le changement de masse entre deux pesées consécutives, chacune effectuée 24 h après le début de l'opération, est inférieure à 0,1 % de la masse totale. Répéter la procédure pour des humidités décroissantes. Un minimum de quatre humidités à peu près régulièrement dans un ordre décroissant, dans la plage de 95 % à 30 % d'humidité relative.

Pour chaque spécimen, la teneur en humidité μ est calculée par l'équation suivante :

$$\mu = \frac{m-m_0}{m_0} ; \quad (2.7)$$

Avec

m = masse à 97% HR

m_0 = masse sèche

Pour la courbe d'absorption ou de désorption, on prend la moyenne des teneurs en humidité calculées pour les différents échantillons à chaque humidité relative. Après avoir calculé la teneur en eau moyenne des différentes éprouvettes à chaque humidité relative, les courbes d'absorption et de désorption peuvent être tracées en reliant les points de données par des lignes droites.

Les isothermes de la courbe de sorption ont été ajusté par le modèle Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB), en utilisant l'équation 2.8 ; où C, k, Wm sont les paramètres de ce modèle.

Ce modèle a été précédemment utilisé pour les briques en terre comprimée et d'autres matériaux de construction pour couvrir un large intervalle d'humidité relative Ψ (5-95 %) (Kabre et al [14], Labat et al [15]).

$$EMC = \frac{CxKxWm}{(1 - Kx\Psi)x(1 - Kx\Psi + CxKx\Psi)} \cdot \Psi \quad (2.8)$$

2.1.3.2. Perméabilité à la vapeur d'eau (méthode des coupelles)

La mesure de la diffusion de la vapeur a été réalisée selon les spécifications de la norme NF EN ISO 12572. En particulier dans le domaine de la construction, ce paramètre est également appelé perméabilité à la vapeur. L'essai consiste à sceller l'échantillon, d'épaisseur (th), au-dessus d'une coupelle d'essai contenant une solution saline de manière à obtenir soit une coupe sèche, soit une coupe humide. L'ensemble du système a été placé dans une chambre climatique à température et humidité contrôlées de sorte que le matériau se trouve entre deux environnements avec des pressions partielles de vapeur différentes, pv1 à l'extérieur du gobelet et pv2 à l'intérieur. Une couche d'air était présente à l'intérieur de la coupelle. En raison du gradient de pression partielle de vapeur entre la partie intérieure de la coupelle et la chambre climatique, un flux de vapeur d'eau s'écoule dans la coupelle climatique, le flux de vapeur d'eau a fait varier la masse du gobelet (absorption de masse pour l'essai avec un gobelet sec et perte de masse pour le gobelet humide). La pesée périodique de l'ensemble a permis de déterminer la densité de masse du flux de masse Jv lorsque l'état d'équilibre est atteint.

Habituellement, les éprouvettes et les coupelles utilisées pour cette méthode sont cylindriques. Cependant, il est très difficile de carotter correctement des cylindres dans une brique sans utiliser de l'eau pendant le carottage. Ainsi, le dispositif expérimental a été modifié pour travailler sur des éprouvettes 5,2x4,5x1 cm³ prismatique. Trois échantillons ont été testé en condition de coupelle humide. Le joint entre l'échantillon et la boîte a été réalisé à l'aide d'une colle Sika Flex PRO-11FC qui est un mastic colle élastique pour le collage souple et le calfeutrement sur la plupart des matériaux de construction dans le bâtiment tels que béton, maçonneries, pierres, bois, métal, briques, terre cuite. Avant le test, les échantillons ont été séchés dans un four à 50° C (HR proche de 7 %) jusqu'à ce que leur poids soit constant (état stable lorsque $\Delta m(t, t+24) < 0,1$ %). Des solutions saturées de Carbonate de potassium (K₂CO₃) et de Chlorure de potassium (KCl) ont été utilisées pour obtenir (83 % RH) dans la coupelle et

de (43 % RH) dans le dessiccateur. La chambre d'essai a été maintenue à 20° C et à 50 % d'humidité relative. Les coupelles entières ont ensuite été pesé à intervalles réguliers jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint. On a considéré que c'était le cas lorsque la différence entre deux pesées consécutives, espacées de 24 heures, est devenue constante (c'est-à-dire qu'elle différait de moins de 0,1 %).

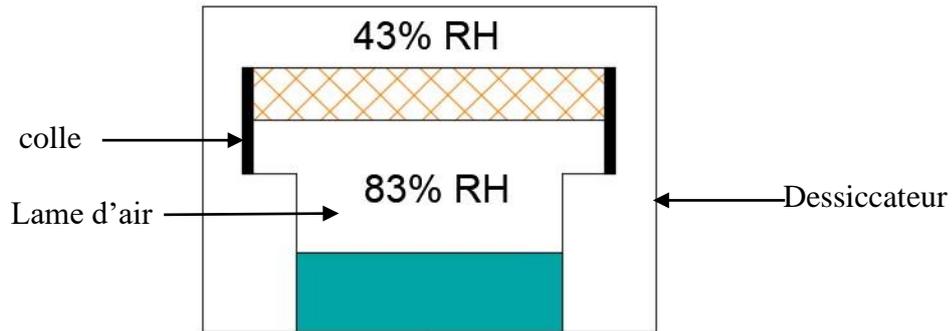


Figure 2.2. Dispositif expérimental de l'essai de perméabilité à la vapeur

La perméabilité des différents échantillons est mesurée à travers les pertes de masse de chaque bocal à intervalle de temps régulier. Une régression linéaire décroissante a été mise en évidence entre les masses consécutives et le temps. Les pentes b de chaque échantillon ont été relevées et les formules suivantes appliquées pour déterminer la résistance μ à la vapeur d'eau [16].

$$\delta_p = \frac{b \cdot e}{S \cdot \Delta P_v}; \quad (2.9)$$

avec :

δ_p = perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon (kg.m1.s1.Pa1) ;

b = pente de l'évolution de la masse en fonction du temps (kg/s) ;

e = épaisseur de l'échantillon (m) ;

S = surface de l'échantillon (m²) ;

ΔP_v = différence de pression de vapeur d'eau dans l'échantillon.

$$\Delta P_v = (HR_1 - HR_2) * 610,5 * e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3 + T}} \quad (2.10)$$

avec :

T = la température dans le dessiccateur (20°C) ;

$HR_1 = 83\%$ d'humidité relative dans la coupelle

$HR_2 = 43\%$ d'humidité relative dans le dessiccateur.

Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau est ainsi donné par le quotient :

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_p} \quad (2.11)$$

Avec ;

$$\delta_{air} = 1,96.10^{-10} \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$$

Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Propriétés physiques

3.1.1. Densité apparente et porosité

Les densités apparentes et porosités des différents éléments de maçonnerie sont présentées dans les figures 3.1, 3.2 et 3.3

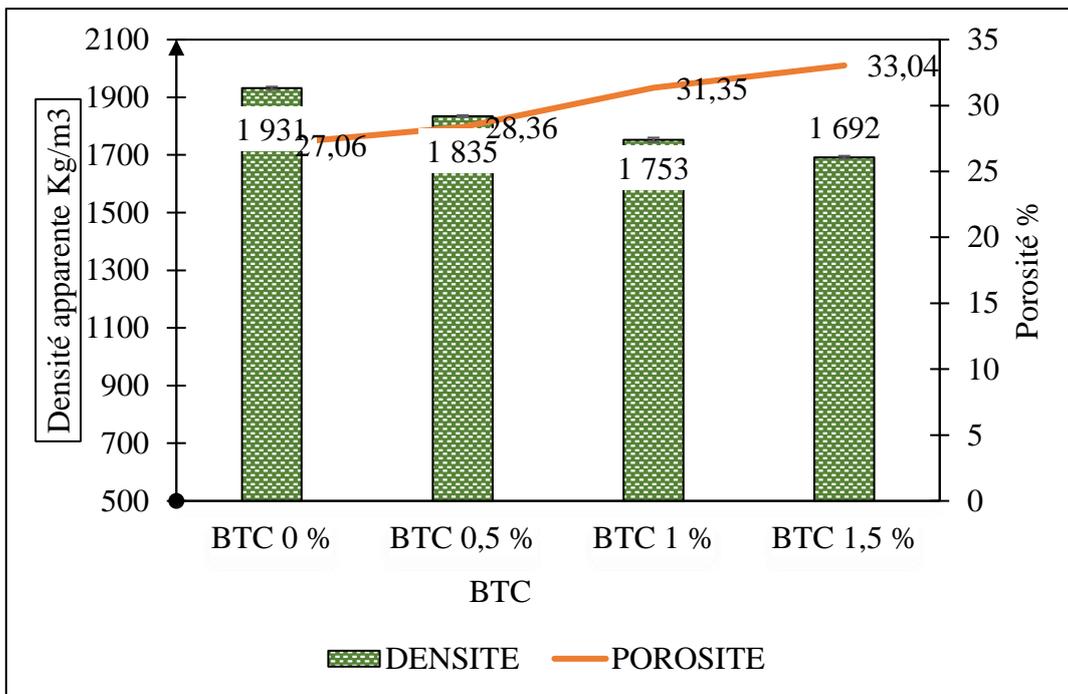


Figure 3.1. Densités apparentes et porosité des BTC

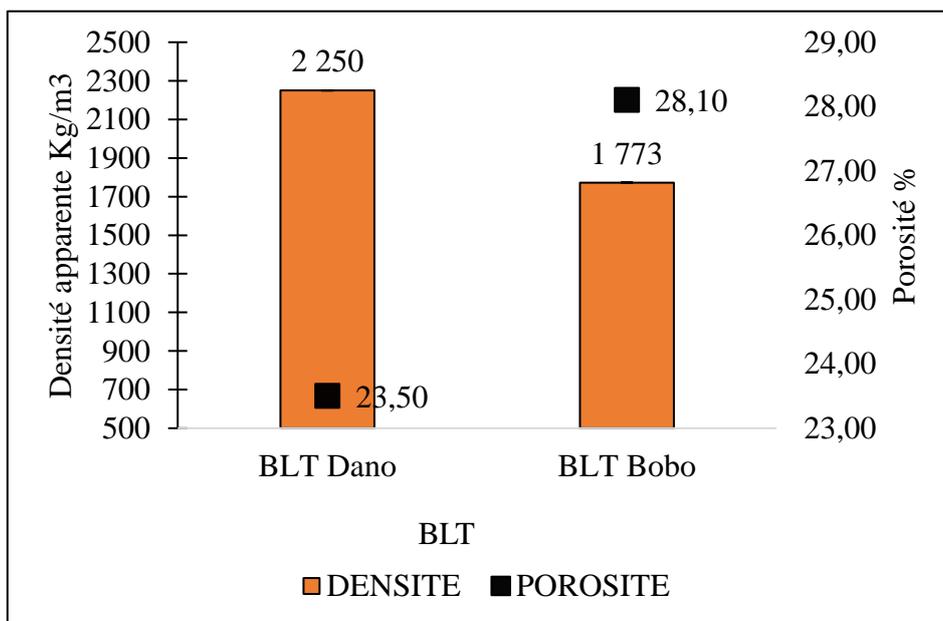


Figure 3.2. Densités apparentes et porosité des BLT

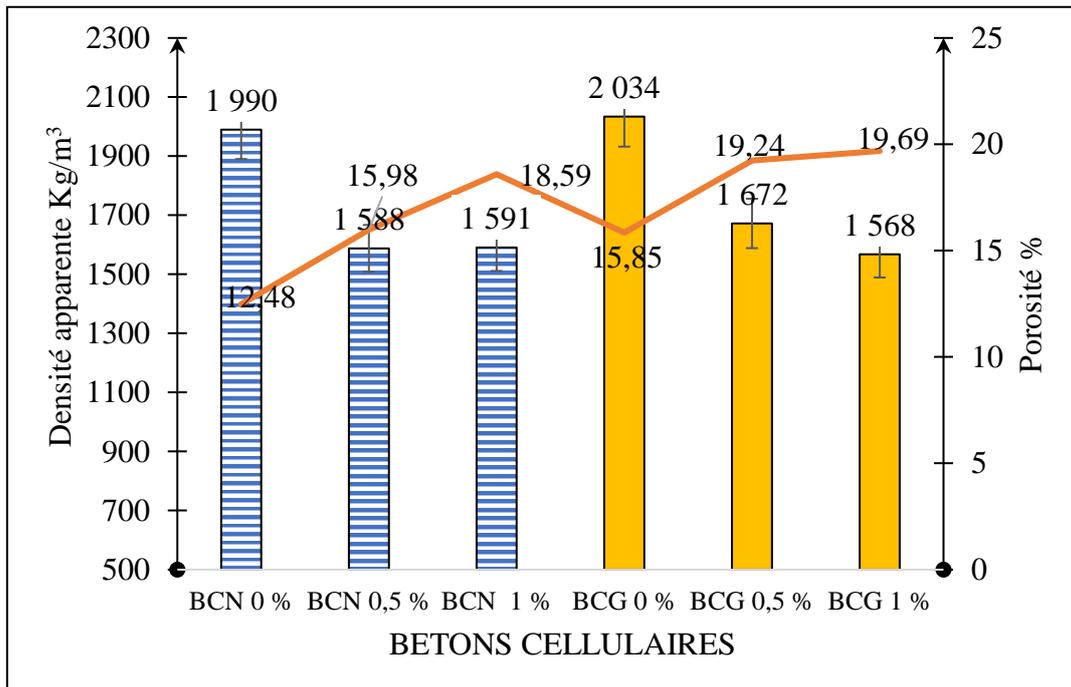


Figure 3.3. Densités apparentes et porosité des bétons cellulaires

Les résultats montrent que pour toutes les formulations l'augmentation du pourcentage de fibres (0 – 1,5 % de fibres) diminue la densité des BTC de 1931 kg/m³ à 1692 kg/m³ tout en augmentant leur porosité de 27,06 % à 33,04 %. L'incorporation de fibres provoque une diminution de la densité apparente des BTC de façon quasi-linéaire et une augmentation de la porosité avec la teneur en fibres, en fonction du type de matériau terreux et de fibre à cause de la masse volumique faible des fibres végétales. Cette observation est en accord avec ceux de Danso et al [17] qui ont travaillé sur la stabilisation des briques de terre avec des coques de noix de coco. Les densité des briques étaient dans la plage (de 1857 kg/m³ à 1795 kg/m³) pour respectivement 0,25 ;0,50 ;0,75 ;1 % de coque de noix de coco. Nshimiyimana et al [18] ont trouvé que l'incorporation de fibres végétales de 0 à 1,2 % dans les briques en terre provoque une diminution de la densité apparente dans la plage de 1690 kg/m³ à 1610 kg/m³ entraînant une augmentation de leur porosité dans la gamme de 30 à 40 %.

Pour les BLT ; la densité apparente des BLT de Dano est de (2250 Kg/m³) et celle des BLT de Bobo est de 1773 Kg/m³ avec une porosité respectivement de 23,50 % et 28,10 %.

L'incorporation de poudre d'aluminium dans les bétons cellulaires avec des taux de (0 – 1 %) fait chuter les densités apparentes respectivement de 1990 à 1591 Kg/m³, de 2034 à 1568 Kg/m³

pour les bétons cellulaires à base de sable de rivière et poudre d'aluminium, et pour les bétons cellulaires à base de résidus de concassé de granite et poudre d'aluminium, ainsi provoque l'augmentation de la porosité des bétons cellulaires (12,48 – 18,59 %) pour les matrices à base de sable de rivière et poudre d'aluminium, et (15,85 – 19,69 %) les matrices à base de résidus de concassé de granite et poudre d'aluminium. En effet la poudre d'aluminium est composée de particules poreuses et son incorporation dans les bétons cellulaires provoque un gonflement qui occasionne des pores.

3.1.2. Absorption d'eau par immersion

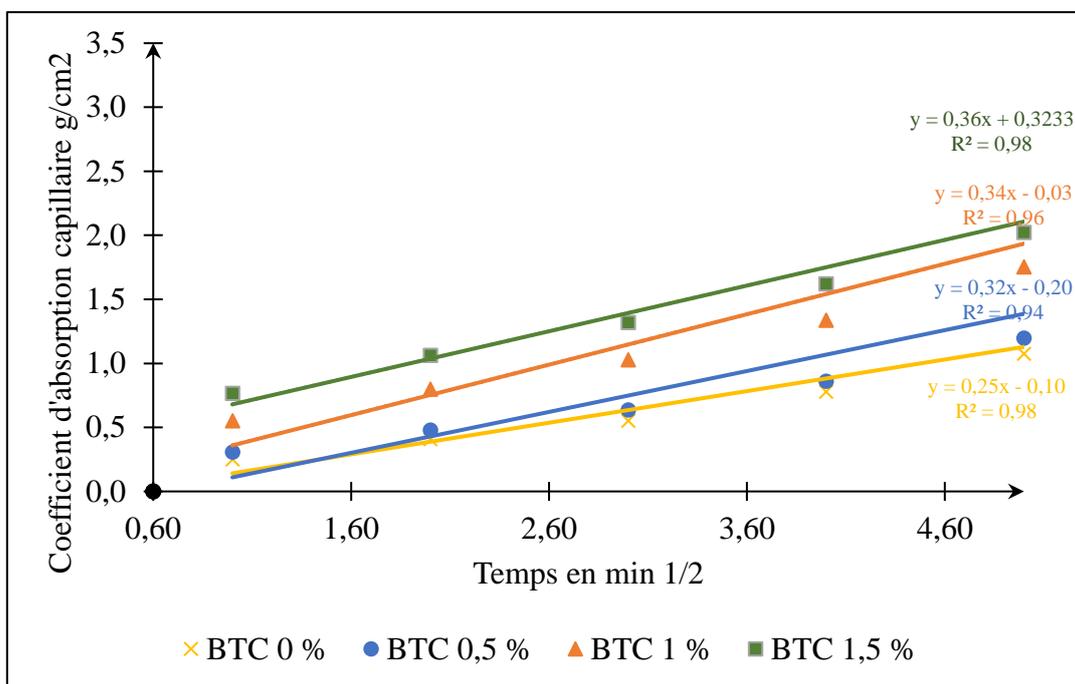


Figure 3.4. Absorption d'eau par immersion capillaire des BTC

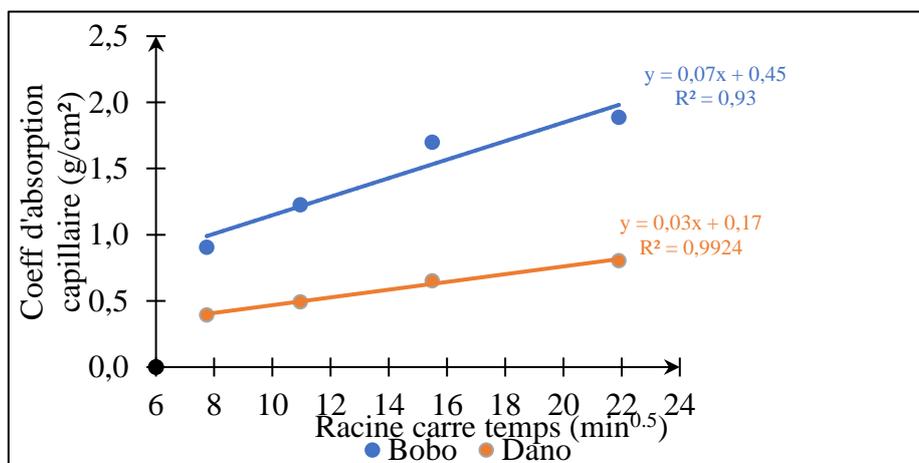


Figure 3.5. Absorption d'eau par immersion capillaire des BLT

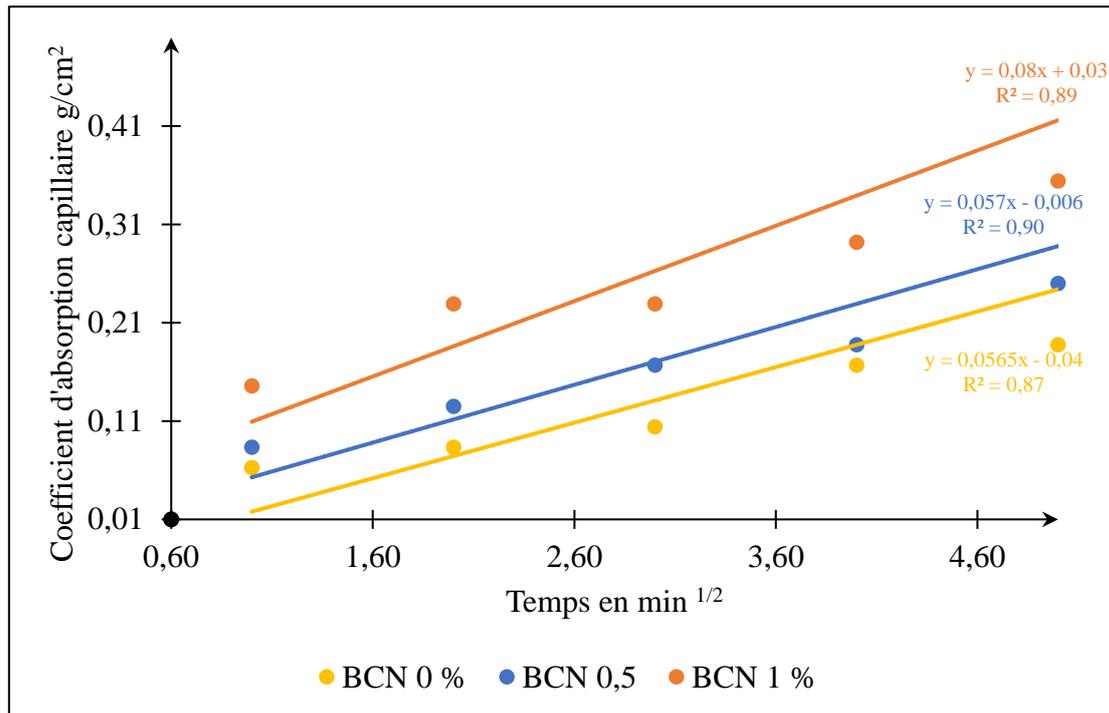


Figure 3.6. Absorption d'eau par immersion capillaire des bétons cellulaires avec sable de rivière et poudre d'aluminium

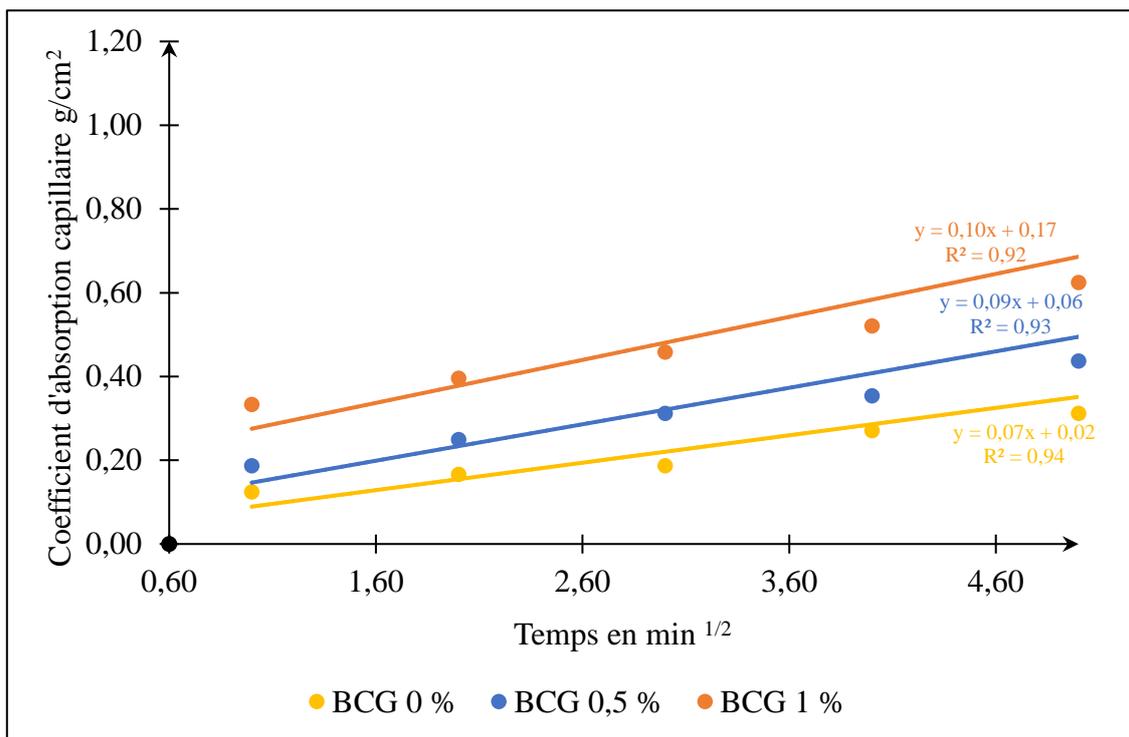


Figure 3.7. Absorption d'eau par immersion capillaire des bétons cellulaires avec sable granitique et poudre d'aluminium

La figure 3.4 montre l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps des BTC stabilisés aux fibres de chiendent. Les résultats montrent que l'absorption augmente avec la quantité de fibre végétale dans le matériau. Cette absorption est due liée à la porosité des matériaux car plus un matériau est poreux plus il absorbe de l'eau. La pente des courbes de tendance représente aussi la sorptivité des différents matériaux. La sorptivité des BTC 0 % est égale à $0,25 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $7,9 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Celle des BTC 0,5 % est égale à $0,32 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $9,67 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Celle des BTC 1 % est égale à $0,33 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $17,36 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Les BTC stabilisées avec 1,5 % de fibres végétales quant à elles ont une sorptivité de $0,36 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $24,20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Les résultats sont en accord avec ceux de Nshimiyimana et al [19] qui ont montré que la sorptivité moyenne des CEBs stabilisés avec 5-25 % de CCR évolue dans la gamme de $0,071-0,084 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ atteignant le minimum avec 15 % de CCR. Pour les BEC stabilisées au CCR:RHA, la sorptivité évolue dans la gamme de $0,056-0,089 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, atteignant le minimum avec 18:2 CCR.

Tous les BTC sauf celle avec 1,5 % de fibres sont des BTC à très faible absorption capillaire selon la norme XP 13-901 [3], car présentant un Cab inférieur à $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

La figure 3.5 montre que des BLT de Bobo-Dioulasso ont une vitesse d'absorption d'eau par capillarité plus élevée que les BLT de Dano. Cette vitesse est d'autant plus élevée quand le diamètre des pores est grand. Ainsi la sorption permet d'avoir une idée sur l'évolution du diamètre moyen des pores dans les matériaux. Les BLT de Bobo-Dioulasso ont une sorptivité de $0,07 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ et une Cab10 de $0,12 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ celles de Dano ont une sorptivité de $0,03 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ avec une Cab10 de $0,05 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$.

La figure 3.6 montre l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps des bétons cellulaires à base de sable de rivière et de poudre d'aluminium. Les résultats montrent que l'absorption augmente avec l'augmentation du taux d'aluminium dans le béton. La sorptivité est déterminée par la pente qui est la vitesse d'absorption d'eau par capillarité. La sorptivité des BCN 0 % est égale à $0,056 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,062 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Celle des BCN 0,5 % est égale à $0,058 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,083 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Et

celle des BCN 1 % est égale à $0,077 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,146 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$

Pour finir, la figure 3.7 montre l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps des bétons cellulaires à base de résidus de concassé de granite et de poudre d'aluminium. Les résultats montrent que l'absorption augmente avec l'augmentation du taux d'aluminium dans le béton. La sorptivité est aussi déterminée par la pente qui est la vitesse d'absorption d'eau par capillarité. La sorptivité des BCG 0 % est égale à $0,066 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,125 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Celle des BCG 0,5 % est égale à $0,087 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,188 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Et celle des BCG 1 % est égale à $0,10 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ avec un coefficient d'absorption capillaire à dix minutes de $0,333 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. La sportivité des bétons cellulaires est aussi liée à leur porosité car la poudre d'aluminium crée des pores dans les matériaux ce qui favorise l'absorption d'eau.

Tableau 3.1. Tableau récapitulatif des coefficients de sorptivité des différents matériaux

Matériaux	Coefficient de sorptivité	Corrélations R^2
BTC 0 %	0,250	0,98
BTC 0,5 %	0,320	0,94
BTC 1 %	0,340	0,96
BTC 1,5 %	0,360	0,98
BLT BOBO	0,070	0,93
BLT de Dano	0,030	0,99
BCN 0 %	0,056	0,87
BCN 0,5 %	0,057	0,90
BCN 1 %	0,080	0,89
BCG 0 %	0,070	0,94
BCG 0,5 %	0,090	0,93
BCG 1 %	0,100	0,92

Comparativement aux BLT de Dano qui ont une faible vitesse de sorption d'eau, les BTC 1,5 % présentent la vitesse de sorption d'eau la plus élevée à cause de leur forte porosité.

3.2. Propriétés thermiques

3.2.1. Conductivité thermique

Les résultats sur la conductivité thermique de chaque matériau sont présentés à la figure 3.8

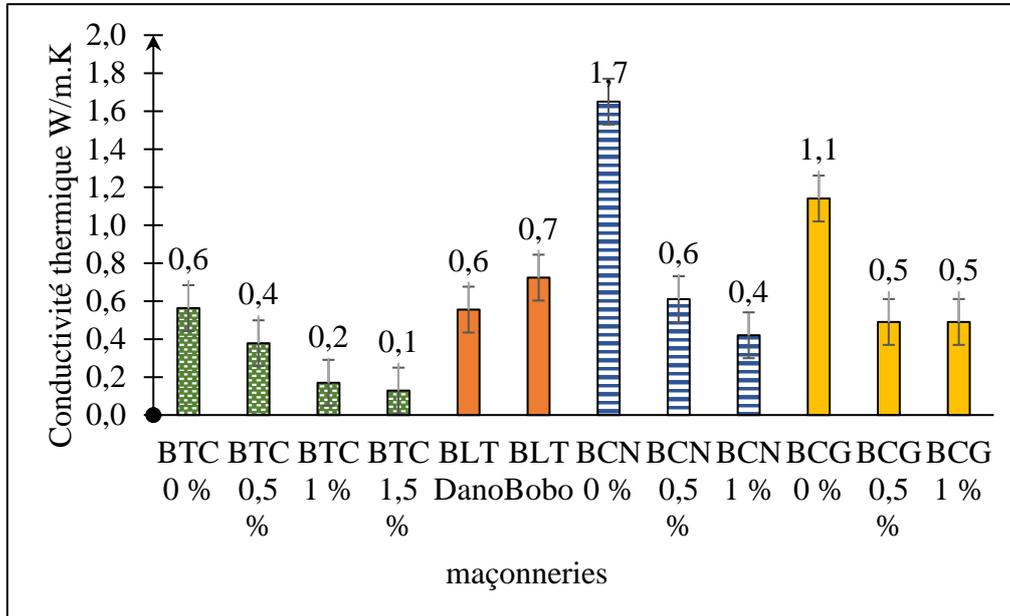


Figure 3.8. Conductivité thermique des maçonneries

La figure 3.8 illustre l'évolution de la conductivité thermique des différents éléments de maçonnerie en fonction de la teneur en stabilisant et de la nature des matériaux. Les résultats montrent que, l'augmentation du pourcentage de fibres de 0 % à 1,5 % dans les BTC a provoqué une diminution de la conductivité thermique. Ca qui est liée à leur densité car plus un matériaux est dense mieux il conduit de la chaleur. La conductivité thermique des briques stabilisées se trouve dans la gamme de 0,6 W/m.K – 0,1 W/m.K pour une variation de la teneur en fibres de 0,5 % à 1,5 %. L'augmentation de la teneur en stabilisant diminue le produit d'hydratation remplissant les espaces entre les particules de terre et en conséquence diminue le flux de chaleur à travers la brique stabilisée en diminuant la conductivité thermique. Ashour et al [20] ont étudié La conductivité thermique moyenne des briques de terre crue renforcées de paille de blé. Ils ont indiqué que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres de 0,961, 0,596 et 0,310 W/m.K pour des teneurs en fibres de 0%, 1% et 3% respectivement.

Pour les BLT, les valeurs de la conductivité thermique des BLT de Dano et de Bobo-Dioulasso qui sont respectivement (0,6 W/m.K et 0,7 W/m.K). Avec cette observation on peut lier la conductivité thermique à la densité car elle est l'un des principaux paramètres physiques qui influence la conductivité thermique. En comparaison avec les résultats de la littérature, les

valeurs trouvées sont très proches de celles obtenues sur les briques de terre comprimée par Pape Moussa Touré [10] qui sont ($0.66 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} < k < 0.85 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

La conductivité thermique des différentes formulations de béton cellulaire tout comme celle des BTC dépend de la teneur en poudre d'aluminium, de la composition soit en sable de rivière ou en résidus de concassé de granite. La conductivité diminue avec l'augmentation de la quantité de chaque composant. Les valeurs sont $1,7 \text{ W/m.K}$; $0,6 \text{ W/m.K}$; $0,4 \text{ W/m.K}$ respectivement pour BCN 0 %, BCN 0,5 %, BCN 1 % et $1,1 \text{ W/m.K}$; $0,5 \text{ W/m.K}$; $0,5 \text{ W/m.K}$ pour BCG 0 %, BCG 0,5 %, BCG 1 %. Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage de poudre d'aluminium provoque une diminution de la conductivité thermique. Cette diminution de la conductivité peut être corrélée à celle de la densité. Ana C.Borbon Almanda et al [21] ont eu des résultats similaires ($0,2958 \text{ W/m.K}$ à $0,1399 \text{ W/m.K}$) lors de leur étude sur la conception et l'application d'un béton cellulaire sur un bâtiment résidentiel mexicain et son influence sur les économies d'énergie dans les climats chauds: Projections jusqu'en 2050.

Comparativement aux autres éléments de maçonnerie les BTC 1,5 % de fibres présentent la plus basse conductivité thermique donc présente un avantage thermique par rapport aux BLT et aux bétons cellulaires.

3.2.2. Effusivité thermique

Les résultats sur l'effusivité thermique de chaque matériau sont présentés dans la figure 3.9

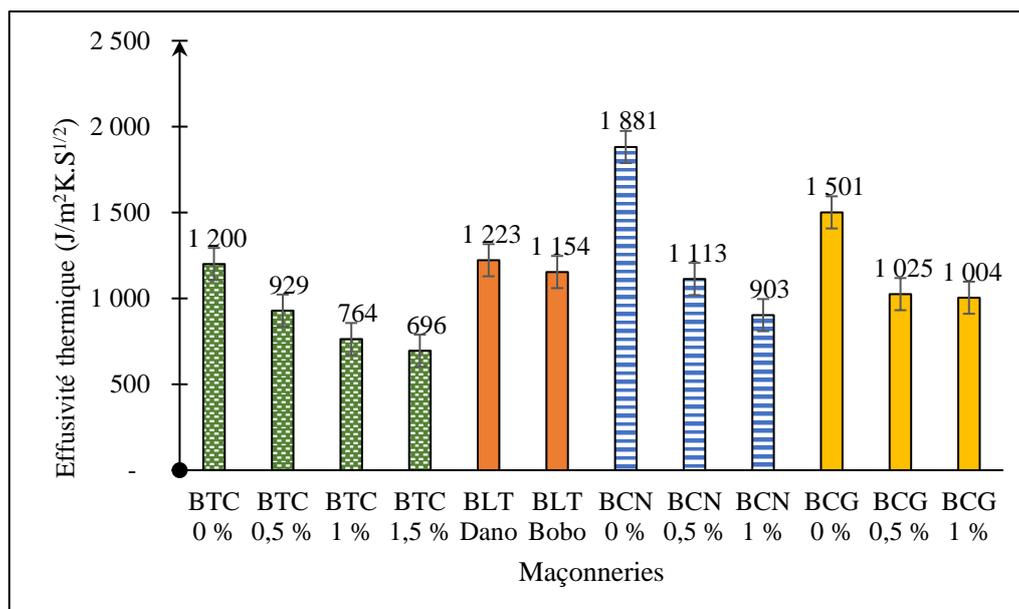


Figure 3.9. Effusivité thermique des éléments de maçonnerie

Les BTC présentent une effusivité thermique qui diminue quand la teneur en fibres végétales augmente. Ainsi, les BTC avec 1,5 % de fibres végétales ont l'effusivité la plus faible (696 $J/m^2.K.S^{1/2}$) contre 1200 $J/m^2.K.S^{1/2}$ pour les BTC 0 %. Les BTC avec 0,5 % et 1 % quant à elles ont des effusivités respectives de 929 $J/m^2.K.S^{1/2}$ et 764 $J/m^2.K.S^{1/2}$. Les mêmes tendances ont été obtenues par Nshimiyimana et al [2] (1290 ; 1010 $J/m^2.K.S^{1/2}$) qui ont mené des études sur les BTC avec 0-25 % de CCR.

Les effusivités thermiques des BLT de Dano et de Bobo-Dioulasso sont respectivement 1223 $J/m^2.K.S^{1/2}$ et 1154 $J/m^2.K.S^{1/2}$.

Les bétons cellulaires présentent aussi les mêmes tendances que les BTC. On remarque que l'effusivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudre d'aluminium dans l'échantillon. Avec des valeurs respectives de 1881 $J/m^2.K.S^{1/2}$; 1113 $J/m^2.K.S^{1/2}$; 903 $J/m^2.K.S^{1/2}$ respectivement pour les BCN 0 %, BCN 0,5 %, BCN 1 % et 1501 $J/m^2.K.S^{1/2}$, 1025 $J/m^2.K.S^{1/2}$, 104 $J/m^2.K.S^{1/2}$ pour les BCG 0 %, BCG 0,5 %, BCG 1 %.

Comparativement aux autres éléments de maçonnerie, les BTC 1,5 % présentent une effusivité beaucoup plus faible ce qui leur donne par conséquent une faible conductivité thermique par rapport aux BCN 0 % qui ont une effusivité plus élevée que celle des BTC 1,5 %

3.2.2. Capacité thermique spécifique

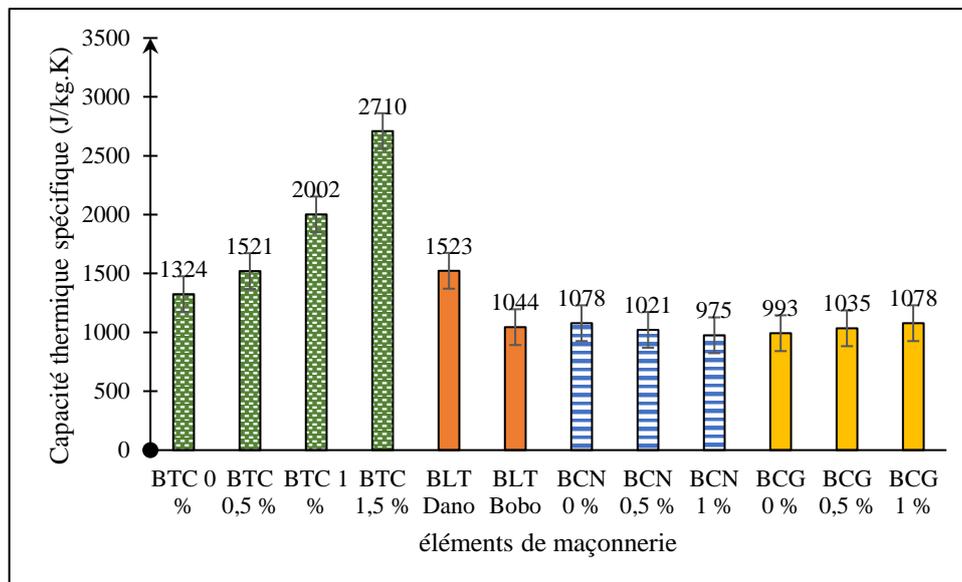


Figure 3.10. Capacité thermique spécifique des éléments de maçonnerie

La figure 3.10 présente les valeurs des capacités thermiques des différents éléments de maçonnerie.

Les valeurs de la capacité thermique spécifique des BTC stabilisées avec les fibres (0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 %) sont respectivement 1324 J/Kg.K ; 1520 J/Kg.K ; 2002 J/Kg.K ; 2709 J/Kg.K. La capacité thermique spécifique des BTC augmente en fonction de l'augmentation de fibre végétales ; ce qui peut être corrélé avec leur porosité car plus un matériau est poreux plus il stock de la chaleur. Ces valeurs sont assez similaires à celles trouvées par Touré [22] qui a mesuré la capacité thermique spécifique de briques de terres. Nshimiyimana et al [23] ont aussi mesuré la capacité thermique des briques de terre contenant 0 - 1.2% de fibres et ont trouvé des valeurs dans la gamme de 915 et 810 J/kg.K ; le maximum avec 1.2 % de fibres.

La capacité thermique spécifique des BLT est de 1523 J/kg.K pour les BLT de Dano et 1044 J/kg.K pour les BLT de Bobo-Dioulasso.

Les bétons cellulaires à base de poudre d'aluminium et de sable de rivière ont une capacité thermique spécifique qui diminue de (1078 J/kg.K à 975 J/kg.K) et (de 923 J/kg.K à 1078 J/kg.K) pour les bétons cellulaires à base de résidus de concassé de granite et de poudre d'aluminium. Les valeurs obtenus démontrent que l'incorporation de poudre d'aluminium provoque une diminution de la capacité thermique spécifique des bétons cellulaires à base de sable de rivière et de poudre d'aluminium. l'effet contraire est observé sur les bétons cellulaires à base de résidus de concassé granitique et de poudre d'aluminium.

3.2.2. Diffusivité thermique

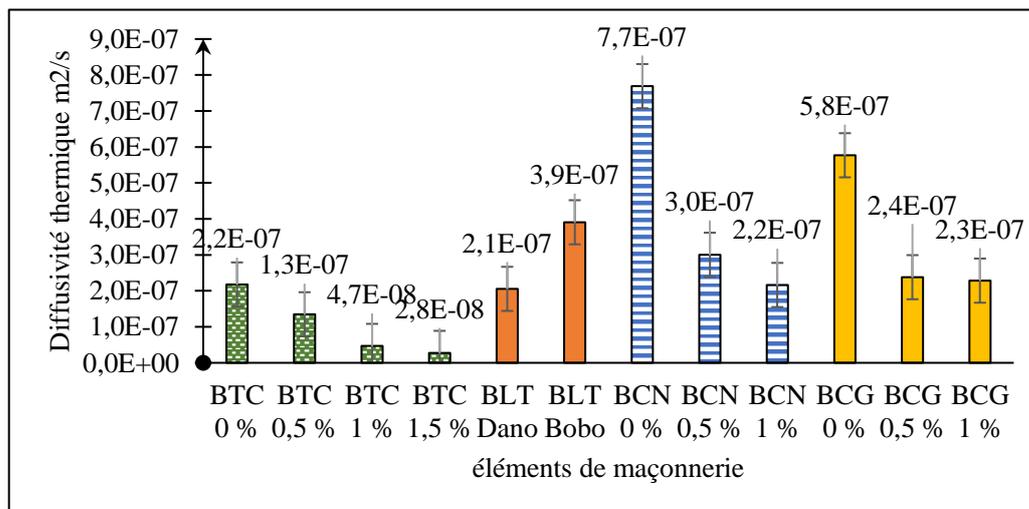


Figure 3.11. Diffusivité thermique des éléments de maçonnerie

La diffusivité thermique des BTC varie de $2,2.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,8.E-8 \text{ m}^2/\text{s}$ en fonction de la teneur en fibres de 0 % à 1,5 % . L'incorporation de fibres diminue la diffusivité thermique tout comme la densité.

Les valeurs de calcul de la diffusivité thermique des BLT sont de $2,1.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ pour les BLT de Dano et de $3,9.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ pour ceux de Bobo.

Les valeurs obtenus sur les bétons cellulaires démontrent aussi que l'incorporation de poudre d'aluminium provoque une diminution de la diffusivité thermique de $7,7.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,2.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ pour les bétons cellulaires à base de sable de rivière et de $5,8.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,3.E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ pour les bétons cellulaires à base de sable granitique.

Comparativement aux autres matériaux, les résultats montrent que les BTC 1,5 % ont la plus faible diffusivité thermique ce qui leur procure un avantage du point de vue matériau qui favorise le confort thermique par rapport aux BCN 0 % qui présente la diffusivité la plus élevée.

3.2.3. Profondeur de pénétration du flux thermique δ_p

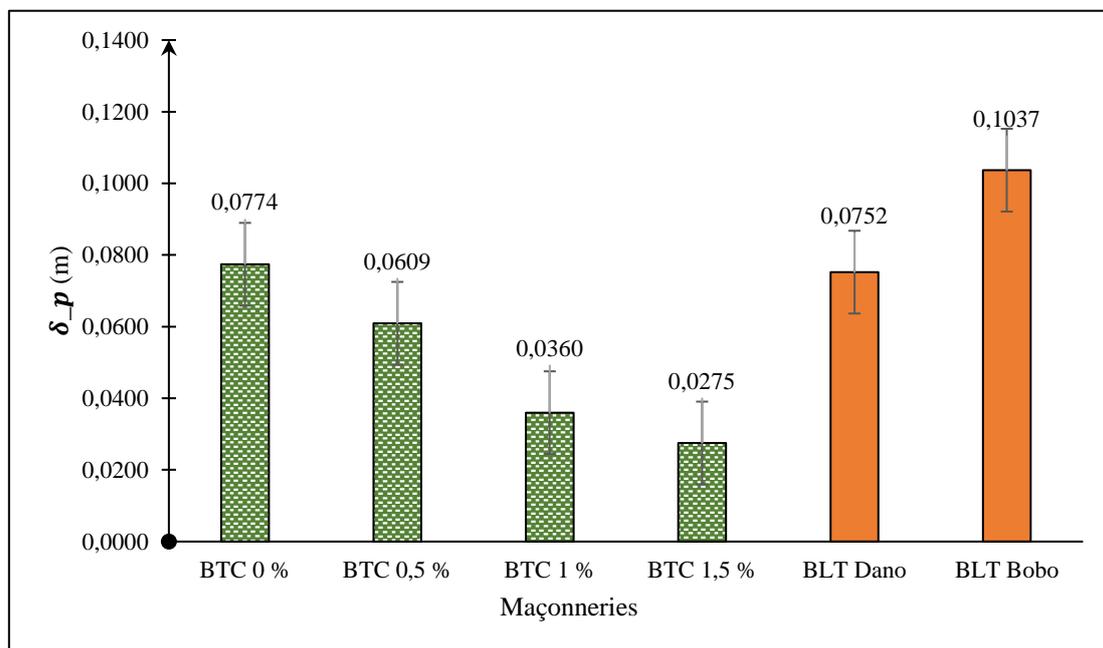


Figure 3.12. Profondeur de pénétration du flux thermique des BTC et BLT

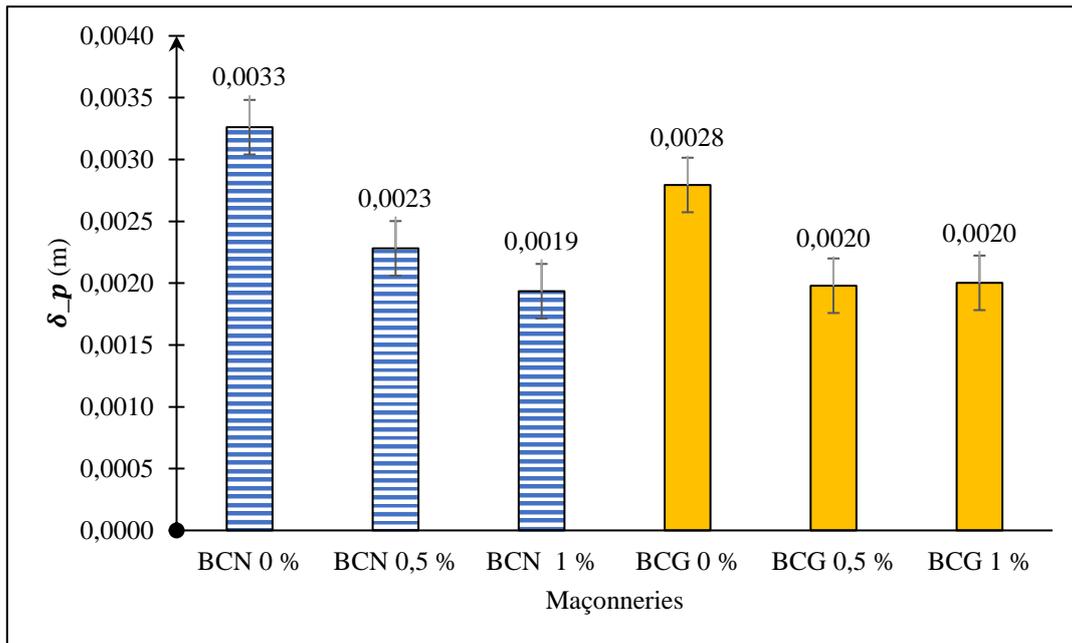


Figure 3.13. Profondeur de pénétration du flux thermique des bétons cellulaires

Les figures 3.12 et 3.13 illustrent l'évolution de la profondeur de pénétration du flux thermique des différents éléments de maçonnerie en fonction de la teneur en stabilisant et de la nature des matériaux. Les résultats montrent que, l'augmentation du pourcentage de fibres de 0 % à 1,5 % dans les BTC diminue la pénétration des flux thermiques. Les valeurs se trouvent dans la gamme de 77,4 mm – 27,5 mm pour une variation de la teneur en fibres de 0,5 % à 1,5 %.

Pour les BLT, les valeurs de la pénétration du flux thermique des BLT de Dano et de Bobo-Dioulasso sont respectivement (75,2 mm et 103,7 mm). Avec cette observation on peut lier la conductivité thermique à la densité.

La profondeur de pénétration des flux thermiques des différentes formulation de béton cellulaire tout comme celle des BTC dépend de la teneur en poudre d'aluminium et de la teneur en sable (sable de rivière et sable granitique). Elle diminue avec l'augmentation de la quantité de poudre d'aluminium. Les valeurs sont 3,3 mm ; 2,3 mm ; 1,9 mm respectivement pour BCN 0 %, BCN 0,5 % , BCN 1 % et 2,8 mm ; 2,0 mm ; 2,0 mm pour BCG 0 %, BCG 0,5 % , BCG 1 %. Les résultats montrent que l'augmentation du pourcentage de poudre d'aluminium provoque une diminution de la capacité de pénétration des flux thermiques. Cette diminution de la profondeur de pénétration du flux thermique peut être aussi corrélée à celle de la densité.

3.3. Propriétés hygroscopiques

3.3.1. Sorption – désorption

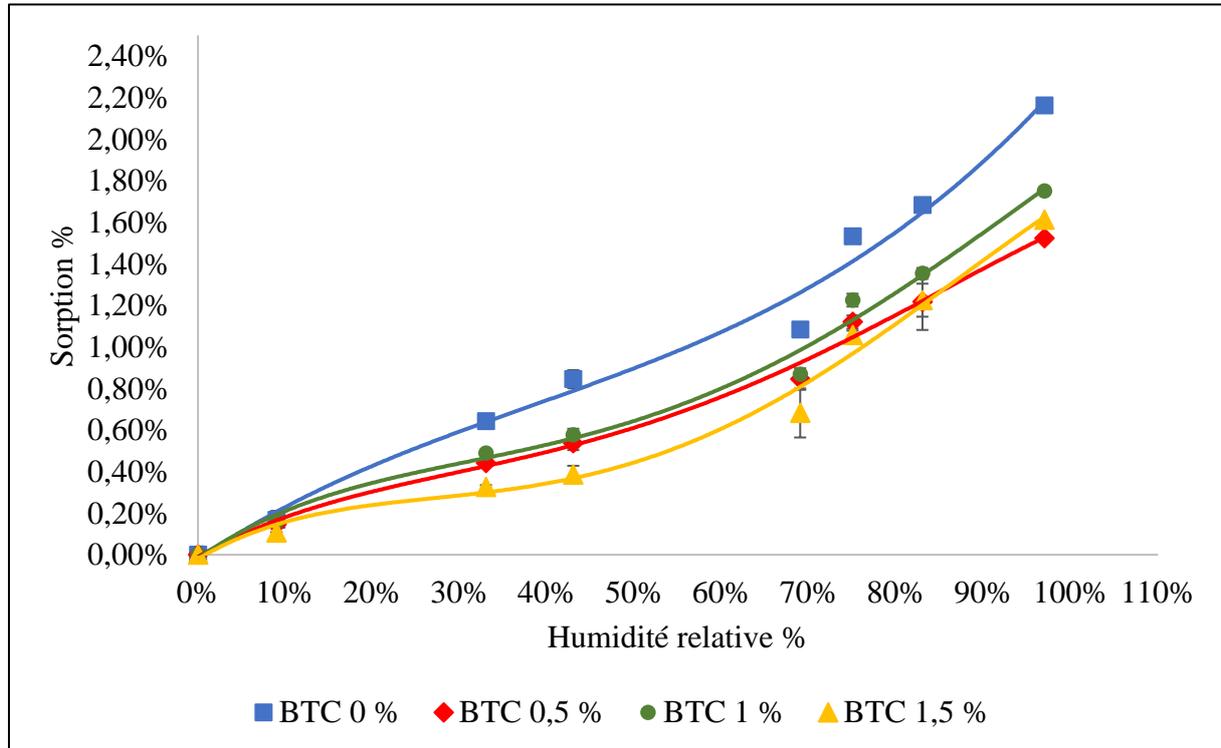


Figure 3.14. Courbes de sorption des BTC

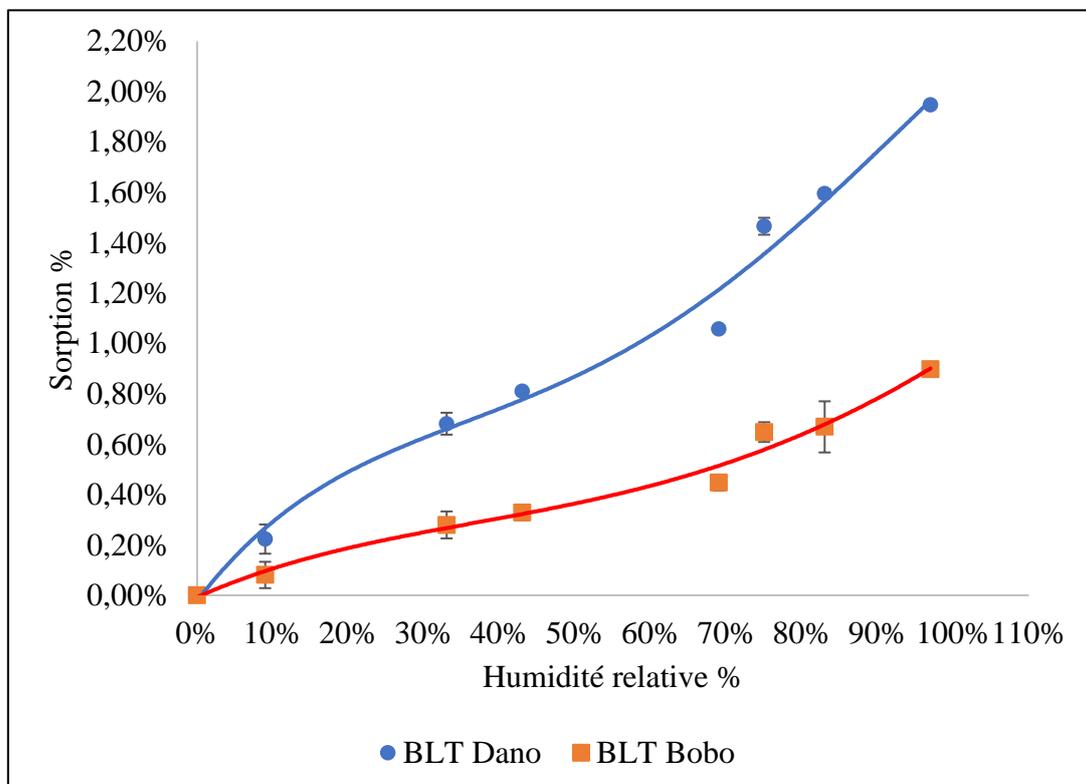


Figure 3.15. Courbes de sorption des BLT

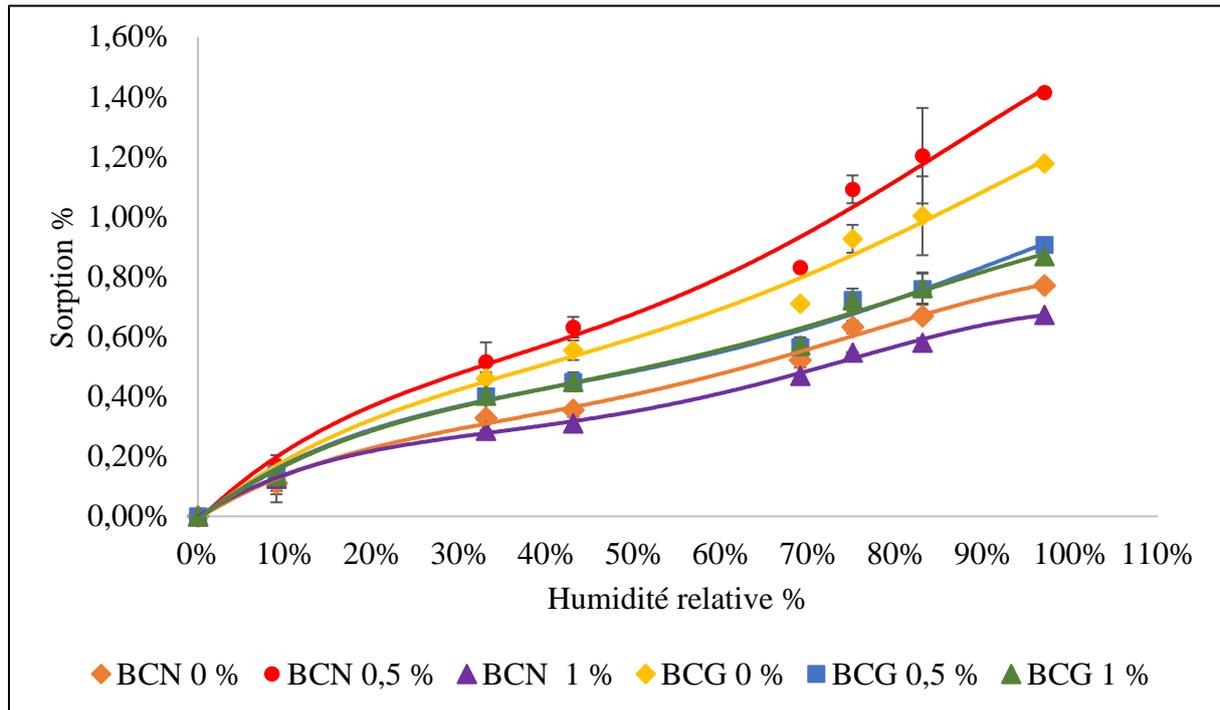


Figure 3.16. Courbes de sorption des bétons cellulaires

Les figures 3.14, 3.15 et 3.16 montrent l'évolution de la teneur en eau des BTC, BLT et bétons cellulaires soumises à une humidité relative croissante pendant un essai de sorption de la vapeur d'eau avec la méthode des solutions saturée. Cagnon et al [9] ont observé les mêmes tendances lors de leur études. Les courbes ont été obtenus pour les niveaux d'humidité relative suivant : 9 % ; 33 % ; 45 % ; 69 % ; 75 % ; 83 % ; 97%. L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour des maçonneries soumises à une humidité relative croissante montre que la réponse des maçonneries à un changement d'humidité relative a été très rapide. Pour chaque étape de l'humidité relative, les masses se sont stabilisées rapidement après seulement 7-10 jours en moyenne. Cependant, le temps de stabilisation et le volume d'eau absorbé sont différents selon la nature du matériau.

Les données de ces courbes sont résumées dans le tableau 3.2 avec les valeurs du pourcentage d'humidité absorbée. Les différences observées sont dues essentiellement à la nature du matériau. En effet, la BTC avec 0 % de fibres a la capacité de sorption la plus élevée en raison de sa teneur en argile. Les valeurs élevées de la teneur en eau ont confirmé la nature hautement hygroscopique des briques de terre. Les teneurs en eau des BTC étaient respectivement de 2,16 % , 1,52 % , 1,75 % et 1,61 % pour les teneurs en fibres de 0 % , 0,5 % , 1 % , 1,5 % . À titre de

comparaison, les béton cellulaires ont des capacité inférieurs avec une teneur en eau évoluant de 0,67 pour les BCN 1 % à 1,41 % pour les BCN 0,5 %. Ceci confirme l'observation de Luizzi et al [24] qui ont montré qu'un sol contenant de la bentonite (matériau riche en montmorillonite) était moins réactif que les autres et absorbait beaucoup plus de vapeur d'eau qu'un sol contenant de la kaolinite. Il faut noter que, les quelques isothermes de sorption mesurées sur les matériaux en terre ne donnent que le résultat final, c'est-à-dire l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative [20], [25], [26].

Les isothermes de tous les éléments de maçonnerie ont une forme similaire, de type III, selon la classification des modèles BET Pavlík et al [27] .

Certaines études ont précédemment rapporté des isothermes de même forme pour les briques en terre stabilisées Kabre et al [26]. Bien que l'isotherme de type II soit généralement la plus commune pour les matériaux de construction poreux [28], y compris certains matériaux en terre Saidi et al [11]. L'isotherme de type III est rapportée pour les rares cas (Pavlík et al [27]).

Tableau 3.2. Pourcentage de sorption des éléments de maçonnerie

RH	0%	9%	33%	45%	69%	75%	83%	97%
BTC 0 %	0,00	0,17%	0,64%	0,85%	1,08%	1,53%	1,68%	2,16%
BTC 0,5 %	0,00	0,15%	0,44%	0,54%	0,85%	1,12%	1,22%	1,52%
BTC 1 %	0,00	0,16%	0,49%	0,58%	0,87%	1,23%	1,35%	1,75%
BTC 1,5 %	0,00	0,11%	0,33%	0,39%	0,68%	1,06%	1,23%	1,61%
BLT Dano	0,00	0,22%	0,68%	0,81%	1,06%	1,47%	1,59%	1,95%
BLT Bobo	0,00	0,08%	0,28%	0,33%	0,45%	0,65%	0,67%	0,90%
BCN 0 %	0,00	0,11%	0,33%	0,36%	0,52%	0,63%	0,67%	0,77%
BCN 0,5 %	0,00	0,17%	0,52%	0,63%	0,83%	1,09%	1,20%	1,41%
BCN 1 %	0,00	0,13%	0,29%	0,31%	0,47%	0,55%	0,58%	0,67%
BCG 0 %	0,00	0,15%	0,46%	0,55%	0,71%	0,93%	1,00%	1,18%
BCG 0,5 %	0,00	0,14%	0,40%	0,45%	0,56%	0,72%	0,76%	0,91%
BCG 1 %	0,00	0,13%	0,40%	0,45%	0,57%	0,72%	0,76%	0,87%

Le tableau 3.2 montre le pourcentage d'absorption des différents éléments de maçonnerie. Les BTC 0 % absorbent beaucoup plus l'humidité relative par rapport aux autres éléments. Ce qui leur procure un avantage du point de de régulation de l'humidité de l'air par rapport aux BCN 1 % qui présentent la plus faible valeur de sorption.

3.3.2. Perméabilité à la vapeur

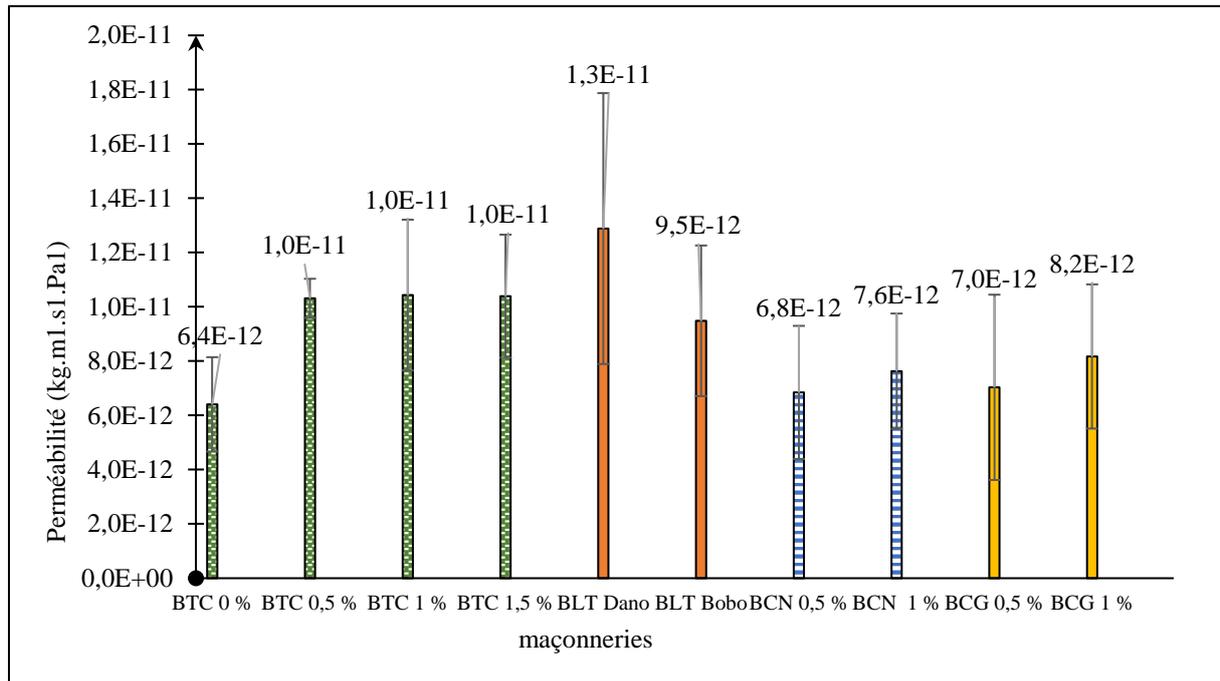


Figure 3.17. Perméabilité à la vapeur d'eau des maçonneries

La figure 3.17 montre que l'augmentation de la teneur en fibres végétales des BTC augmente sa perméabilité à la vapeur d'eau. Les BTC avec 0,5 % ; 1 % ; 1,5 % de fibres présentent une perméabilité de $1.E-11 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$. En effet la variation de la perméabilité des BTC est sensiblement égale à 0 à partir de 1 %. Celle des BTC 0 % est égale à $6,4.E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$.

Les BLT de Dano et de Bobo-Dioulasso ont respectivement $1,3.E-11 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$ et $9,5. E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$ comme valeur de perméabilité à la vapeur.

La poudre d'aluminium a le même effet sur les bétons cellulaires que celui qu'a les fibres sur les BTC. En effet l'augmentation du pourcentage de poudre d'aluminium augmente la perméabilité des bétons cellulaires. Les BCN 0,5 % ; BCN 1 % ; BCG 0,5 % ; BCG 1 % ont respectivement une perméabilité à la vapeur d'eau de $6,8.E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$; $7,6.E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$; $7,00.E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$; $8,2.E-12 \text{ kg.m}^1.s^1.Pa^1$

3.3.3. Coefficient de résistance à la vapeur d'eau

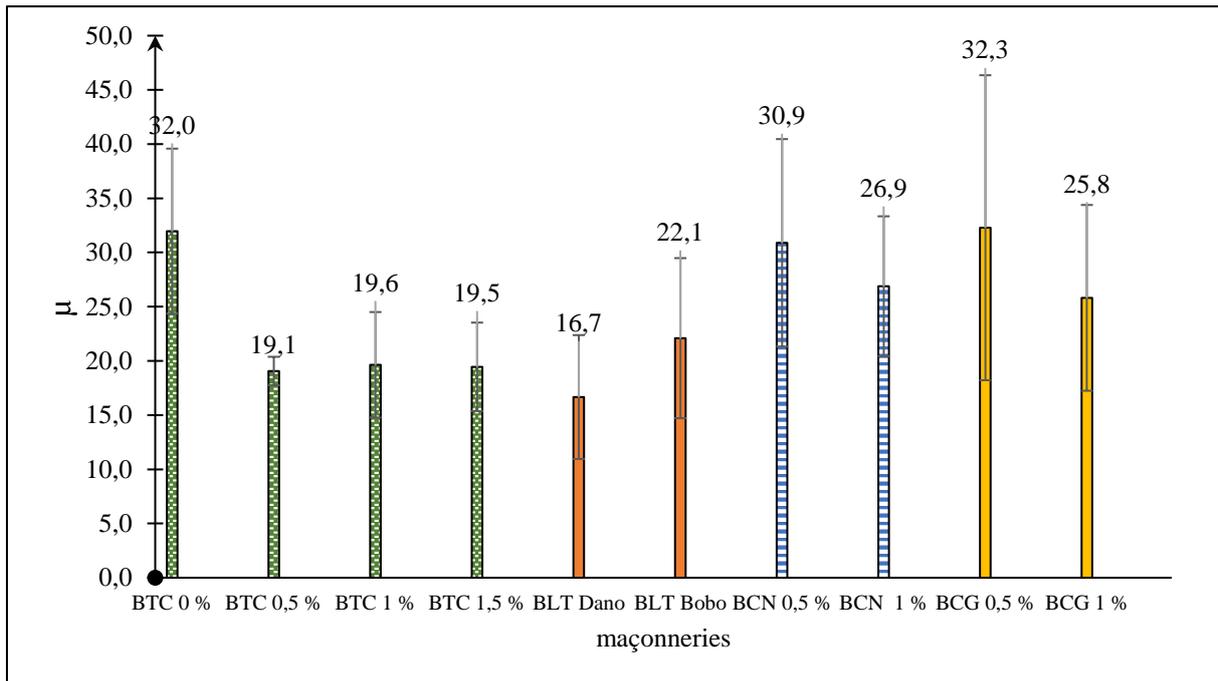


Figure 3.18. Coefficient de résistance à la vapeur des maçonneries

La figure 3.18 montre le facteur de résistance à la vapeur d'eau des différents éléments de maçonnerie à l'aide d'essais en coupelle humide. Pour les BTC, la stabilisation avec 0,5 % ; 1 % ; 1,5 % de fibres végétales présentent des résistances à la perméabilité à la vapeur d'eau respectifs de : 19,1 ; 19,6 ; 19,5. Les BTC sans ajout de fibres ont une résistance élevée de 32. Donc l'ajout de fibres végétales dans les BTC diminue considérablement la résistance à la perméabilité. Les mêmes observations se font sur les bétons cellulaires. L'ajout de poudre d'aluminium réduit la résistance à la vapeur d'eau. Elle passe de 30,9 à 26,9 pour les bétons cellulaires à base de poudre d'aluminium et sable de rivière et de 32,3 à 25,8 pour les bétons cellulaires à base de poudre d'aluminium et sable granitique.

Comparativement aux autres éléments de maçonnerie, les BLT de Dano présentent le plus faible coefficient de résistance à la vapeur d'eau. Ce qui leur procure un avantage du point de vue confort intérieur par rapport aux autres éléments de maçonnerie comme les BCG 0,5 % qui ont le coefficient de résistance le plus élevé .

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude présente une série d'analyse expérimentale sur le comportement physico thermique et hygroscopique des BTC, BLT et bétons cellulaires à base de poudre d'aluminium. Les propriétés hygrothermiques essentiellement abordées étaient la sorption de la vapeur dépendant de l'humidité, la perméabilité à l'eau, la capacité thermique, la conductivité et l'effusivité thermique. Les différents éléments de maçonnerie ont été également caractérisés d'un point de vue physique. Cette caractérisation a montré que les BTC et les bétons cellulaires présentaient des caractéristiques physiques différentes en fonction du pourcentage de fibres végétales et de poudre d'aluminium. L'une des principales différences entre les différentes formulations concernait la densité et aussi la porosité. En effet l'incorporation de fibres végétales dans les BTC et de poudre d'aluminium dans les bétons cellulaires diminue considérablement la densité apparente qui est dans la gamme de 1931 kg/m^3 - 1692 kg/m^3 pour les BTC, de 1990 kg/m^3 à 1591 kg/m^3 pour les BCN et de 2034 kg/m^3 - 1568 kg/m^3 pour les BCG ; ce qui a pour effet contraire d'augmenter la porosité. Cette observation se fait aussi au niveau des BLT. Les BLT de Dano en raison de leur forte densité (2250 kg/m^3) présentent une porosité beaucoup plus faible (23,5 %) que celles de Bobo-Dioulasso qui ont une densité de 1773 kg/m^3 et une porosité de 28,1 %. Les propriétés thermiques des différentes formulations ont aussi montré que la stabilisation des BTC avec les fibres végétales à 0 % ; 0,5 % ; 1 % ; 1,5 % et des bétons cellulaires avec la poudre d'aluminium à 0 % ; 0,5 % ; 1 % ; présentent un avantage du point de vue confort thermique dans l'habitat par rapport aux matériaux non stabilisés. Les propriétés hygrothermiques des BTC et des BLT ont confirmé leur capacité à absorber rapidement une quantité importante de vapeur d'eau : 2,16 %, 1,52 %, 1,75 %, 1,61 % respectivement pour BTC 0 % ; 0,5 % ; 1 %, 1,5 % et 1,95 % ; 0,90 % pour les BLT de Dano et de Bobo-Dioulasso et donc leur capacité à réguler l'humidité relative de l'air intérieur. Les BTC stabilisées avec les fibres et les bétons cellulaires avec la poudre d'aluminium avaient une faible résistance à la perméabilité à la vapeur d'eau ; soit 32 ; 19,1 ; 19,6 ; 19,5 pour les BTC 0 % ; 0,5 % ; 1 % ; 1,5 % et 30,9 ; 26,9 ; 32,3 ; 25,8 pour les BCN 0,5 % ; 1 % et les BCG 0,5 % ; 1 % . Les résultats des expériences de sorption utilisant la méthode de la solution saturée de sels ont mis en évidence une autre propriété hygiénique positive des différents éléments de maçonnerie.

Leurs propriétés hygrothermiques ont confirmé leur capacité à absorber rapidement une quantité importante de vapeur d'eau et donc leur capacité à réguler l'humidité relative de l'air intérieur.

Le comportement dynamique de la sorption et de la désorption de la vapeur d'eau par les matériaux devrait être étudié plus en détail dans le futur et comparé avec celui d'autres matériaux de construction considérés comme "les parpaings de ciment" car la vitesse de réponse des matériaux en terre à un changement d'humidité relative est certainement l'une de leurs propriétés les plus intéressantes pour réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments. D'autres tests expérimentaux sont nécessaires pour étudier le comportement hygroscopique instantané des matériaux de construction en reproduisant mieux la situation réelle du climat intérieur. Les tests conventionnels pour la mesure des isothermes de sorption-désorption ont été réalisés en mode statique, en attendant que l'état d'équilibre soit atteint à chaque étape d'augmentation (ou de diminution) de l'humidité relative. Ces tests ont donné des informations intéressantes sur les propriétés physiques des milieux poreux mais ne permettaient pas de connaître l'évolution réelle de l'humidité relative (et donc la réponse du matériau utilisé à l'intérieur des bâtiments). Ces tests sur le comportement dynamique de la sorption - désorption de la vapeur d'eau pourront être réalisés en utilisant la méthode NORDTEST, par exemple, pour mesurer la MBV (Moisture Buffer Value) (la valeur tampon pour l'humidité) de ces matériaux [29], [30].

Concernant le test de perméabilité à la vapeur d'eau, les mesures de la résistance à la vapeur d'eau sur les éléments de maçonnerie étaient beaucoup plus grandes que celles trouvées dans la littérature (le triple de la valeur moyenne). Le principal intérêt de ces éléments de maçonnerie du point de vue thermique concerne leur conductivité thermique qui varie de 0,6 W/m.K – 0,1 W/m.K pour les BTC ; de 0,6 à 0,7 W/m.K respectivement pour les BLT de Dano et de Bobo, de 1,7 à 0,4 W/m.K pour les BCN et de 1,1 à 0,5 W/m.K pour les BCG. Leur effusivité thermique varie de 1200 à 696 J/m².K.S^{1/2} pour les BTC ; de 1881 à 903 J/m².K.S^{1/2} pour les BCN, de 1501 à 1004 J/m².K.S^{1/2} pour les BCG. Les diffusivités varient aussi de 2,2.E-12 à 2,8.E-8 m²/s pour les BTC ; 7,7.E-7 à 2,2.E-7 m²/s pour les BCN ; de 5,8.E-7 à 2,3.E-7 m²/s pour les BCG. En outre, la présente étude expérimentale sur l'utilisation des éléments de maçonnerie comme matériau de construction pour améliorer le confort des occupants et la qualité de l'air intérieur pourrait être avantageusement complétée par l'utilisation de données expérimentales mesurées dans des modèles via un logiciel hygrothermique comme WUFI Plus.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ONU HABITAT, 2015 « L'état des villes africaines, réinventer la transition urbaine » 278 pages .
- [2] P. Nshimiyimana, A. Messan, et L. Courard, août 2020 « Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders », *Materials*, vol. 13, n° 17, p. 3769, doi: 10.3390/ma13173769.
- [3] Norme Française, 2017« XP P13-901- 2017 AFNOr-1.pdf ».
- [4] J.-L. Izard, , 2006 « L'INERTIE THERMIQUE DANS LE BATIMENT », p. 20.
- [5] Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, CRATerre-EAG « Blocs de terre comprimée » Volume II, manuel de conception et de construction.
- [6] S. O. Sore, 2013 « Etude technique des BTC stabilisés à la chaux éteinte » Mémoire 2iE, 63 pages.
- [7] M. Hassanati, 2010 « La caractérisation des carrières latéritiques de Dano pour les applications dans l'habitat » Mémoire 2iE, 65 pages.
- [8] « Mémento technico-économique du béton cellulaire 2012 ».
- [9] H. Cagnon, J. E. Aubert, M. Coutand, et C. Magniont, sept. 2014 « Hygrothermal properties of earth bricks », *Energy Build.*, vol. 80, p. 208-217, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- [10] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilinson, sept. 2017 « Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB) », *J. Build. Eng.* vol. 13, p. 266-271, , doi: 10.1016/j.job.2017.08.012.
- [11] M. Saidi, A. S. Cherif, B. Zeghmati, et E. Sediki, avr. 2018 « Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks », *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, p. 566-577, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063.
- [12] C. Habsya, K. Diharjo, P. Setyono, et P. Satwiko, oct. 2018 « Physical, mechanical and thermal properties of lightweight foamed concrete with fly ash », *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 420, p. 012062, , doi: 10.1088/1757-899X/420/1/012062.
- [13] « EN 12571 (2000) en EN (BATIMENTS - Sorption hygrosopique).pdf ».
- [14] S. Kabre, F. Ouedraogo, B. Naon, A. Messan, et J. C. Benet, 2019. « Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (BTC) issues de la carrière de Matourkou, au Burkina Faso », p. 11.

- [15] M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, et J.-E. Aubert, 2015.12.004. « From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential », *Build. Environ.*, vol. 97, p. 69-81, févr. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.
- [16] « EN 12572 (2001) en FR (BATIMENTS - Transmission de la vapeur d'eau).pdf ».
- [17] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, et J. B. Williams, déc. 2015 « Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres », *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, p. 797-809, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069.
- [18] P. Nshimiyimana, C. Hema, O. Zoungrana, A. Messan, et L. Courard, nov. 2020, « THERMOPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPRESSED EARTH BLOCKS CONTAINING FIBRES: BY-PRODUCT OF OKRA PLANT AND POLYMER WASTE », p. 149-161. doi: 10.2495/ARC200121.
- [19] P. Nshimiyimana, A. Messan, et L. Courard, juin 2021 « Hydric and Durability Performances of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders: Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash », *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33, n° 6, p. 04021121, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003745.
- [20] T. Ashour, A. Korjenic, S. Korjenic, et W. Wu, oct. 2015 « Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum », *Energy Build.*, vol. 104, p. 139-146, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.016.
- [21] A. C. Borbon-Almada *et al.*, nov. 2020, « Design and Application of Cellular Concrete on a Mexican Residential Building and Its Influence on Energy Savings in Hot Climates: Projections to 2050 », *Appl. Sci.*, vol. 10, n° 22, p. 8225, doi: 10.3390/app10228225.
- [22] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilinson, sept. 2017, « Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB) », *J. Build. Eng.*, vol. 13, p. 266-271, doi: 10.1016/j.job.2017.08.012.
- [23] P. Nshimiyimana, A. Messan, et L. Courard, août 2020 « Physico-Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Product Binders », *Materials*, vol. 13, n° 17, p. 3769, doi: 10.3390/ma13173769.
- [24] S. Liuzzi, M. R. Hall, P. Stefanizzi, et S. P. Casey, mars 2013, « Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate », *Build. Environ.*, vol. 61, p. 82-92, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.12.006.

- [25] M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, et J.-E. Aubert, févr. 2016, « From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential », *Build. Environ.*, vol. 97, p. 69-81, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.12.004.
- [26] S. Kabre, F. Ouedraogo, B. Naon, A. Messan, et J. C. Benet, , 2019 « Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (BTC) issues de la carrière de Matourkou, au Burkina Faso », p. 11.
- [27] Z. Pavlík, J. Žumár, I. Medved, et R. Černý, févr. 2012 « Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis », *Transp. Porous Media*, vol. 91, n° 3, p. 939-954, , doi: 10.1007/s11242-011-9884-9.
- [28] E. B. Møller, 2014, « Moisture assessment by fast and non-destructive in-situ measurements », p. 9.
- [29] Rode et al, 2022 « Moisture Buffering of Building Material ».
- [30] Repère 2013 « Chiffres clés de l'énergie édition », p. 53.