Comportement hygrométrique et hydrique des blocs de terre comprimée stabilisés à la poudre de coques d'arachide

Nassio Sory, Issiaka Sanou, Kassoum Barry,
Youssouf Sawadogo, Moussa Ouedraogo,
Lamine Zerbo, Mohamed Seynou

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie
J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2025), 054 : 85 - 98
30ème Année, 2025

ISSN 0796-6687
Code Chemical Abstracts : JSOCF2
Cote INIST (CNRS France) : <27680>
Site Web: **http://www.soachim.org**
http://www.soachim.info

Comportement hygrométrique et hydrique des blocs de terre comprimée stabilisés à la poudre de coques d'arachide

Nassio Sory[a,b], Issiaka Sanou[b,c], Kassoum Barry[b,d], Youssouf Sawadogo[b], Moussa Ouedraogo[b,e], Lamine Zerbo[b], Mohamed Seynou[b*]

[a]*Ecole polytechnique de Ouagadougou (E.P.O), 18 BP 234, Ouaga 18, Burkina Faso*
[b]*Laboratoire de Chimie Moléculaire et des Matériaux (LC2M), équipe de physico-chimie et de Technologie des matériaux UFR/SEA, Université Joseph Ki-Zerbo 03 BP 7021 Ouagadougou*
[c]*Laboratoire de Chimie et Energies Renouvelables (LaCER), Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (UFR/SEA), Université Nazi BONI, Bobo-Dioulasso, B.P. 1091 Bobo 01, Burkina Faso*
[d]*Université Lédéa Bernard OUEDRAOGO, Ouahigouya 01, Burkina Faso*
[e]*Université virtuelle du Burkina Faso, Ouaga 2000, Burkina Faso 03, Burkina Faso*

(Reçu le 18/08/2025– Accepté après corrections le 21/12/2025)

Résumé : Les habitats à base de terre crue souffrent d'un manque de durabilité lié à l'humidité et à la faible tenue à l'eau des matériaux de construction . L'objectif du présent travail est d'étudier le comportement hygrométrique et hydrique des blocs de terre comprimée (BTCs) stabilisés à la poudre de coques d'arachide. Pour ce faire, une terre argileuse du Burkina Faso composée de la kaolinite (40 %), de la muscovite (8 %), de la goethite (10 %) et du quartz (34 %) avec une plasticité moyenne (Ip =22 %) a été utilisée pour élaborer des BTCs amendés aux poudres de coques d'arachide (PCA). Le processus d'élaboration a consisté à substituer la terre argileuse par des teneurs en PCA allant de 10 à 35 % (pas de 5 %), puis le mélange a subi une contrainte de compactage à 10 MPa. Principalement, les isothermes de sorption/désorption, la conductivité hydrique et les cycles de mouillage séchage des BTCs ont été étudiés. Il ressort des résultats obtenus que l'incorporation de la poudre de coques d'arachide dans la matrice argileuse diminue considérablement la conductivité hydrique des BTCs jusqu'à une teneur optimale de 20_% en PCA. La présence des PCA favorise le phénomène d'adsorption d'eau et défavorise le phénomène de désorption.. Par ailleurs, la création de micropores par les PCA au sein de la matrice argileuse favorise la rétention de l'eau limitant ainsi le processus de désorption. La nuance B10 contenant 10_% de PCA a un pouvoir de sorption plus important par rapport aux autres nuances, à différents taux d'humidité relative. Le BTC B10 résiste également mieux aux cycles de mouillage-séchage (3x25 minutes). Compte tenu de l'amélioration de ses propriétés hygrométriques et de sa bonne tenue à l'eau, le BTC contenant 10 % en masse de PCA conviendrait mieux à la construction d'habitats durables.

Mots clés : poudre de coque d'arachide, isothermes de sorption-désorption, conductivité hydrique, cycles de mouillage séchage, habitats durables.

Hygrometric and water behavior of compressed earth blocks stabilized with peanut shell powder

Abstract : Earthen habitats suffer from a lack of durability due to moisture and the poor water resistance of construction materials. The aim of the present study is to investigate the hygric and hygrometric behavior of compressed earth blocks (CEBs) stabilized with peanut shell powder (PSP). For this purpose, a clay soil from Burkina Faso, composed of kaolinite (40 wt.%), muscovite (8 wt.%), goethite (10 wt.%), and quartz (34 wt.%), with medium plasticity (Ip = 22 wt.%), was used to produce CEBs amended with peanut shell powder. The preparation process involved substituting the clay soil with PSP contents ranging from 10 wt.% to 35 wt.% (in increments of 5 wt.%), followed by compaction under a pressure of 10 MPa. The study primarily focused on sorption/desorption isotherms, water conductivity, and wetting–drying cycles of the CEBs.
The results indicate that incorporating peanut shell powder into the clay matrix significantly reduces the water conductivity of the CEBs, with an optimal effect observed at 20% PSP content. The presence of PSP enhances water adsorption while hindering desorption. Furthermore, the creation of micropores by PSP within the clay matrix promotes water retention, thereby limiting the desorption process. The B10 variant, containing 10 wt.% PSP, exhibits a higher sorption capacity compared to other formulations across different relative humidity levels. In addition, the B10 block demonstrates greater resistance to wetting–drying cycles (3 × 25 minutes). Considering the improvement in its hygrometric properties and enhanced water resistance, the CEB containing 10 wt.% PSP by mass appears most suitable for the construction of durable habitats.

Key words : peanut shell powder, sorption-desorption isotherms, water conditivity, wetting-drying cycles, sustainables habitats.

[*] Auteur de correspondance : M SEYNOU, seynou1mohamed@yahoo.fr

1. Introduction

La terre crue fait partie des premières matières utilisées par l'homme dans la construction d'habitats du fait de son abondance et de sa maniabilité. Bien qu'elle ait été progressivement remplacée par le ciment en raison de sa faible résistance mécanique et de sa vulnérabilité à l'eau, elle suscite aujourd'hui un regain d'intérêt grâce à ses nombreux avantages écologiques, sociaux, culturels et économiques. En Afrique, plus de 2/3 de la population vit dans des bâtisses en terre crue, un choix motivé par la disponibilité locale des matériaux, leur faible coût et leur facilité d'utilisation avec une main-d'œuvre peu qualifiée [1]. Ce type de construction présente des atouts écologiques majeurs, notamment des propriétés thermo-hygrométriques adaptées au climat local. La terre crue offre également une bonne isolation thermique, une bonne régulation d'humidité, une résistance au feu et des qualités esthétiques appréciées [2], [3],[4].

Afin d'améliorer la durabilité, en particulier les performances mécaniques de la construction en terre crue, la technique des briques en terre comprimée a été développée. Malgré les nombreux avantages liés à l'utilisation de cette technique, force est de constater que les briques non stabilisées présentent une forte porosité, favorisant l'adsorption et la désorption de l'eau sous forme de vapeur. Ce phénomène, caractérisé par les isothermes de sorption et de désorption, influence directement la stabilité dimensionnelle, la résistance mécanique et le confort hygrothermique des constructions en terre crue. Malheureusement, l'hystérésis des isothermes de sorption/désorption conduit à des modifications irréversibles de la microstructure des BTCs, compromettant ainsi leur durabilité. Cette vulnérabilité explique leur rejet au profit des blocs de béton (ou parpaings), plus résistants mais moins écologiques[5].

Pour pallier ces problèmes de durabilité que rencontrent les BTCs, des études scientifiques ont été menées sur la stabilisation de la terre crue par des liants minéraux (ciment ou chaux) pour la plupart [6], [7]. Ces études ont montré que la stabilisation des briques en terre crue par des liants minéraux permet d'en améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité [8]. Cependant, l'ajout des liants minéraux contrebalance les avantages environnementaux de la terre crue et limite sa recyclabilité après démolition d'autant plus que les gains de performances sont faibles. Or, certaines pratiques traditionnelles, notamment dans les pays en voie de développement, et quelques récentes études scientifiques ont montré que l'utilisation de liants organiques d'origine naturelle (fibres végétales, sciure de bois, bouse de vache, etc…) pouvait être une alternative plus vertueuse du point de vue environnemental par rapport aux liants minéraux[4] [6], [7], [9]. Ainsi, des travaux sont réalisés à plusieurs échelles pour améliorer les performances des matériaux de construction par l'utilisation des résidus agricoles. Cette utilisation qui permet d'obtenir des matériaux bio-sourcés plus écologiques et durables-a-l'avantage de valoriser les résidus agricoles (balles de riz, épis de maïs, fibre de coco, …) [10], [11], [12]. La poudre de coque d'arachide, résidu abondant et sous-exploité dans plusieurs régions agricoles, notamment en Afrique de l'Ouest, a fait l'objet d'études en vue de sa valorisation dans la stabilisation des briques en terre crue [2] [3]. Ces études ont montré une amélioration des propriétés physique, hydrique~~,~~et mécanique des briques stabilisées. Bien que ces travaux aient permis d'améliorer certaines propriétés caractéristiques des briques en terre crue, il n'en demeure pas moins que peu d'études ont été consacrées à l'étude de leurs propriétés hygrométriques à notre connaissance [13].

Ce travail s'inscrit donc dans une démarche de valorisation des déchets agricoles à travers l'étude du comportement hygrométrique et hydrique des BTCs stabilisés à la poudre de coques d'arachide. Il vise à évaluer l'influence de cet additif naturel sur la capacité des blocs à adsorber, restituer ou résister à l'humidité, afin d'optimiser leurs performances en conditions réelles d'utilisation.

2. Matières premières et méthodes expérimentales

2.1. Matières premières

Une terre argileuse du Burkina Faso, extraite sur le site argileux de Kongoussi, référencé BAM, a été utilisée comme matière de base dans la fabrication des briques de terre comprimée. Le site est situé au centre-nord du Burkina Faso aux coordonnées géographiques 13°18' latitude Nord et 1°30' longitude Ouest. Ce site est largement exploité par la population locale pour la fabrication de poteries et de matériaux de construction (briques, revêtements des toits ou des murs). C'est un site potentiel en termes de volume et~~ peut ~~pourrait justifier une gestion pérenne.

Cette terre argileuse a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique dans nos travaux antérieurs. Nous exposons ici quelques résultats majeurs de cette caractérisation.

La limite de liquidité (45_%) et l'indice de plasticité (22%) (**Tableau I**) indiquent que BAM est approprié pour la confection des BTCs selon la norme XP P13-901 (2001) [14] . La valeur au bleu de méthylène (V_{BS}) de 4,44g pour 100g d'échantillon est comprise entre

2,5 et 6g/100g et montre que BAM est une argile à caractère limoneux de plasticité moyenne [15].
Du point de vue minéralogie (**Figure 1 et Tableau II**), BAM est composé de 40 % de kaolinite ($2SiO_2,Al_2O_3,2H_2O$) et de 8 % de muscovite ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) comme phases argileuses cristallines. A côté de ces phases coexistent des minéraux associés comme le quartz (SiO_2) à hauteur de 34 % et la goethite (FeO(OH)) à hauteur de 10_%. Dans le cas des blocs de terre comprimée, la muscovite, la kaolinite et le quartz sont des minéraux importants dans les compositions puisqu'ils ne favorisent pas un phénomène de retrait/gonflement lors du séchage et de la réhumidification [16]. Les minéraux argileux (kaolinite et muscovite) jouent le rôle de plastifiant, le quartz est le dégraissant et la goethite le colorant.

La poudre organique utilisée dans cette étude pour la stabilisation des BTCs, référencée PCA provient des coques d'arachide qui sont des sous-produits agricoles. Elles ont été collectées aux environs de la ville de Banfora, localité située au sud-ouest du Burkina Faso. En effet, l'arachide ou Arachis hypogea L., une plante annuelle appartenant à la famille des légumineuses, occupe la douzième place parmi les productions végétales mondiales et constitue une culture essentielle dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales [17], [18]. En tant que sous-produit agricole peu valorisé, elles sont disponibles en grande quantité dans les zones de culture d'arachide, ce qui en fait une ressource abondante et bon marché. Après la récolte de l'arachide, les coques sont le plus souvent abandonnées dans la nature, constituant ainsi un déchet nuisible à l'environnement. La valorisation de ces coques en tant qu'adjuvant dans les matériaux de construction se présente alors comme une solution à la préservation de l'environnement.

Tableau I: Propriétés géotechniques de l'argile BAM

Distribution de la taille des particules (%)				Limites d'Atterberg (%)			Valeur au Bleu de méthylène (%)
< 2 mm (sable grossier)	< 0,425 mm (sable fin)	< 80 µm (limons)	< 2 µm (argiles)	W_L	W_p	I_p	4,44
2	16	32	80	45	23	22	

Tableau II: Composition minéralogique de l'argile BAM

Phases	Kaolinite	Muscovite	Goethite	Quartz	Balance
%	40	8	10	34	8

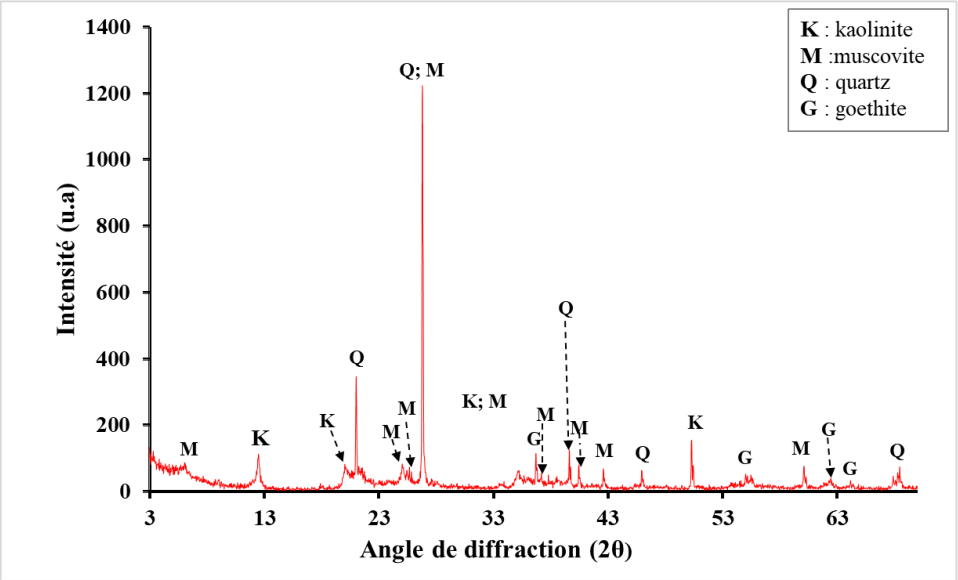

Figure 1 : Diffractogramme de l'argile BAM

2.2. Elaboration des blocs de terre comprimés (BTC)

Les blocs de terre comprimés ont été élaborés à partir ~~de~~ d'un mélange d'argile et de poudre de coques d'arachide broyées à une granulométrie de 210 µm.

La teneur en eau a été déterminée en utilisant la méthode statique qui consiste à préparer plusieurs échantillons avec différentes teneurs en eau et à les compacter avec la même force. La teneur en eau optimale est celle qui permet d'obtenir un bloc plus dense.

Après avoir déterminé la teneur en eau, différents mélanges sont préparés et homogénéisés à sec pendant 15 min avec la poudre de coques d'arachide avant de subir un malaxage manuellement à l'état humide pendant une vingtaine de minutes. Les mélanges obtenus ont été conservés dans un sachet en plastique hermétiquement fermé dans une salle à température contrôlée (25 °C) pendant 48 h en vue de permettre un murissement. A l'issue des 48 h, les pâtes humidifiées de masse constante sont introduites dans un moule cylindrique (50 × 160 mm^2) ou prismatique (40 × 40 × 160 mm^3) puis pressées. Les éprouvettes ont été fabriquées par compression statique à l'aide d'une presse hydraulique de type *PRUFSYSTEME DigiMess M-10*. Durant toute l'étude, nous avons appliqué une contrainte de compactage de 10 MPa. Le **Tableau III** donne la composition des mélanges utilisés pour chacune des formulations. La **figure 2** illustre les différentes étapes de l'élaboration des BTCs.

2.3. Comportement hygrométrique

Le comportement hygrométrique des BTCs a été mis en évidence par la mesure des isothermes de sorption-désorption en utilisant des solutions salines saturées conformément à la norme NF EN ISO 12571 [19]. Quatre humidités relatives, à savoir 17,7±0,5 ; 43,4±0,3 ; 73,3±0,4 et 95±2 %RH, ont été utilisées pour les tests **(Tableau IV)**.

Les échantillons préalablement séchés à 105 °C, ont été placés sur des grilles en céramique à l'intérieur du dessiccateur étanche contenant une des solutions salines saturées (**Figure 3**). Le dessiccateur hermétiquement fermé a été placé dans une chambre à 20 °C et 60 % d'humidité relative. Les échantillons ont été par la suite pesés périodiquement jusqu'à ce que la variation entre deux résultats consécutifs à 24 heures d'intervalle soit inférieure à 0,1 %. Le test de sorption s'achève dès lors qu'un équilibre d'humidité est atteint et les échantillons sont immédiatement transférés dans l'humidité relative inférieure pour mesurer la branche de désorption.

Tableau III: Proportions des mélanges utilisées

Référence	B0	B10	B15	B20	B25	B30	B40
Argile (% en masse)	100	90	85	80	75	70	60
Poudre de coques d'arachide (% en masse)	0	10	15	20	25	30	40
Teneur en eau (% en masse)	19	21	23	25	26.5	28.5	30.5

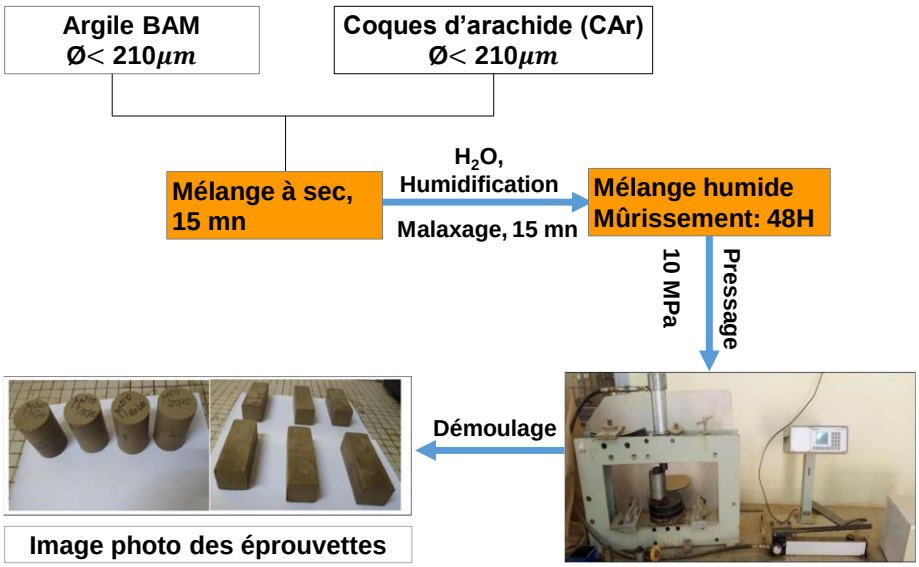

Figure 2 : les étapes d'élaboration des BTCs

2.4. Propriétés hydriques

Le test mouillage – séchage et la perméabilité à l'eau sont les deux paramètres hydriques évalués au niveau des BTCs.

Le test de cycles mouillage-séchage a été réalisé conformément à la norme ASTD D 559 [20]. Ce test a été utilisé pour simuler d'éventuelles contraintes environnementales locales auxquelles peuvent être exposés les BTCs. Ce test consiste à plonger des BTCs dans l'eau pendant 25 minutes. Au bout des 25 minutes, les BTCs sont retirés de l'eau et séchés pendant 48 h à 71 °C. L'essai est répété six fois (**figure 4**).

La perméabilité à l'eau a été évaluée conformément à la norme ISO 17892-11 (2019)[21] afin d'évaluer l'aptitude des BTCs aux infiltrations des eaux de pluie. Les éprouvettes préalablement séchées à 105 °C, ont été introduites dans des tuyaux en PVC. Les BTCs sont par la suite saturés en eau par introduction d'eau de quantité importante sur leur surface supérieure. La perméabilité à l'eau a été mesurée en déterminant la variation du niveau d'eau dans le tuyau en PVC (à l'aide d'un pied à coulisse) pendant un intervalle de temps de 24 heures (**figure 5**).

La perméabilité a été calculée en utilisant la relation 2 :

$$K = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} ln \left[\frac{h_1 + \frac{R}{2}}{h_2 + \frac{R}{2}}\right] \quad \textbf{(2)}$$

Avec :

K : la perméabilité hydrique (m/s)

R : rayon du tuyau (m)

h_1 : niveau initial (m) de l'eau au temps t_1 (s)

h_2 : niveau initial (m) de l'eau au temps t_2 (s)

3. Résultats et discussion

3.1. Minéralogie et microstructure des BTCs amendés à la poudre de coques d'arachide

Le diffractogramme de poudre des BTCs (**figure 6)** indique la présence de la kaolinite, du quartz, de la muscovite et de la goethite qui composaient la matière première argileuse de base. Aucune modification minéralogique n'est observée avec l'ajout de poudre de coques d'arachide. Ceci pourrait s'expliquer soit par le fait que les quantités d'eau ne sont pas suffisantes pour permettre la libération des polyphénols des coques ou soit par le fait que les polyphénols libérés par les coques d'arachide n'ont pas pu s'insérer entre les feuillets des minéraux argileux.

Tableau IV : Solutions salines saturées utilisées pour obtenir une humidité relative différente à 23 °C

Formule des molécules	NaOH	K_2CO_3	NaCl	K_2SO_4
Humidité relative (%HR)	$17{,}7 \pm 0{,}5$	$43{,}4 \pm 0{,}3$	$73{,}3 \pm 0{,}4$	95 ± 2

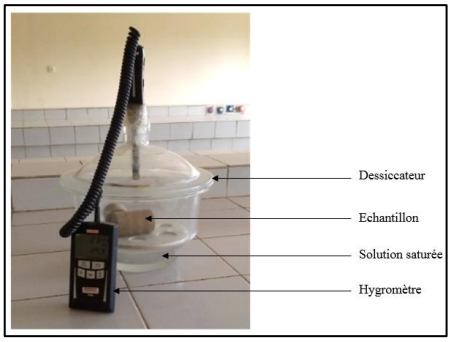

Figure 3: Dispositif du test de sorption/désorption

Figure 4 : Image du dispositif de mouillage-séchage

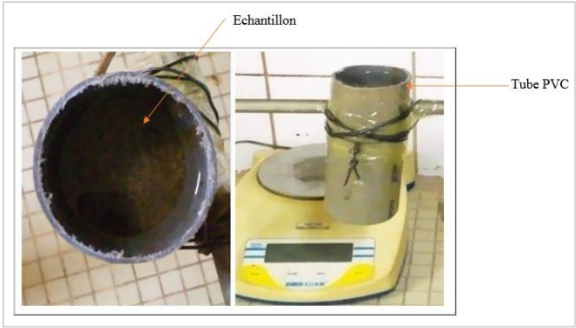

Figure 5 : Dispositif de mesure de la perméabilité hydrique

Néanmoins, on constate une réduction en intensité de l'ensemble des raies à l'exception des raies du quartz qui augmentent. Cette réduction est due à la dilution des phases argileuses suite à leur substitution partielle par la poudre de coque d'arachide. L'augmentation des raies du quartz pourrait être due à l'apport de la silice libre de la poudre de coques d'arachide. Les résultats de DRX sont complétés par ceux de la spectrométrie infrarouge (**Figure 7**). Les résultats montrent dans les hautes fréquences des bandes caractéristiques de la vibration de la liaison OH des groupements hydroxyles de la kaolinite à 3689 et 3618 cm^{-1} [22], [23]. Ces mêmes bandes pourraient être attribuées à l'étirement des liaisons O-H des molécules de cellulose et des hémicelluloses [3] des coques. La bande à 3618 cm^{-1} pourrait être aussi liée à la vibration de la liaison Al-OH dans la muscovite[5], [9] [24]. La bande observée autour de 1614 cm^{-1} pourrait correspondre aux vibrations de l'eau absorbée et à l'élongation symétrique des liaisons C=O des groupements carboxyles présents dans les hémicelluloses et de la lignine [25], [26]. La bande à 993 cm^{-1} serait attribuable à la vibration d'élongation symétrique de liaison Si-O-Si dans la kaolinite[23]**.** La bande à 906 cm^{-1} pourrait quant à elle correspondre aux vibrations de la déformation des liaisons Al-OH de la kaolinite. La présence du quartz est marquée par les bandes caractéristiques des liaisons Si-O à des fréquences autour de 773, 673 et 516 cm^{-1} [9]. Ces différents résultats corroborent ceux de la DRX.

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) sur des fragments de BTC sont présentées sur la **figure 8**. L'image de la référence sans ajout de poudre de coques d'arachide montre une microstructure homogène et dense, avec des microfissures observées qui pourraient être dues au départ de l'eau lors du séchage. Avec 10_% en masse de poudre de coques d'arachide, le matériau présente une microstructure toujours homogène et plus dense. De 15 à 25 % en masse de poudre de coques d'arachide, le matériau devient hétérogène avec la présence des micropores connectés par endroits et quelques microfibres bien adhérées à la matrice argileuse. Au-delà de 30 % en masse de poudre de coque d'arachide dans les BTCs, la densification est affectée par l'apparition de pores. La taille des pores et leur nombre augmentent avec la teneur en poudre de coques d'arachide et le matériau obtenu présente un aspect de plus en plus spongieux avec des empilements de fibres par endroits. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la présence de PCA résiduelle n'ayant pas participé à l'effet de remplissage dans la matrice du BTC. .

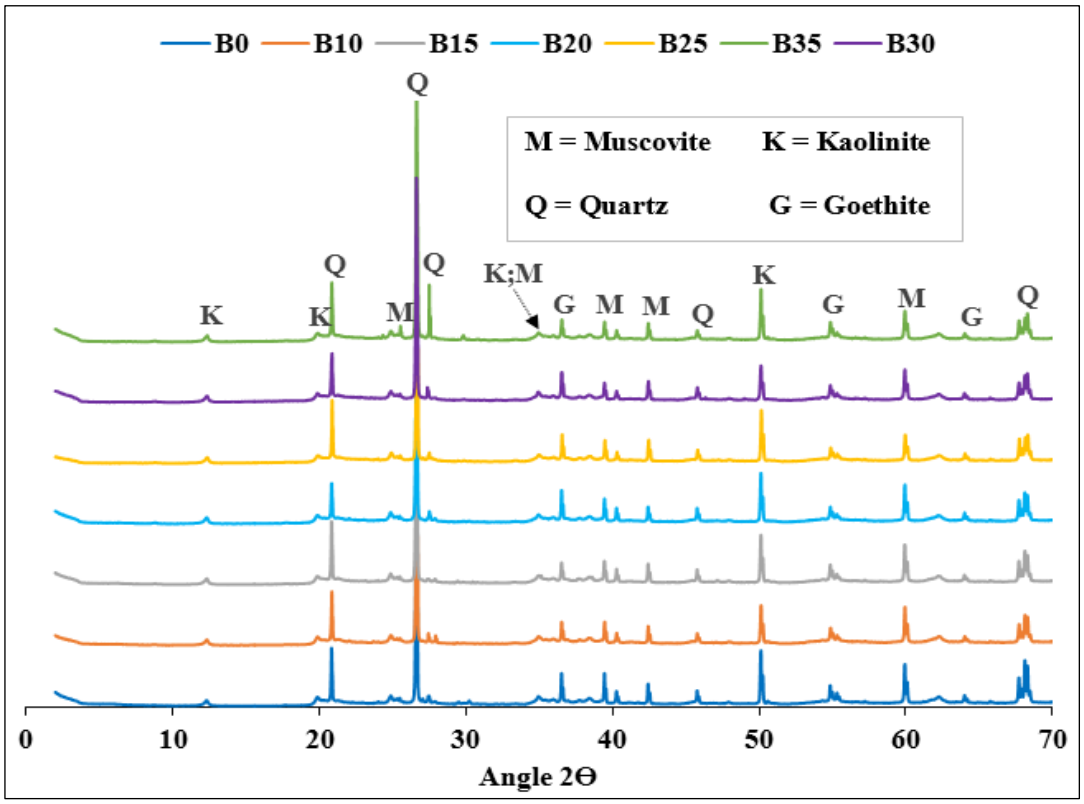

Figure 6: Diffractogrammes de poudre des BTC élaborés

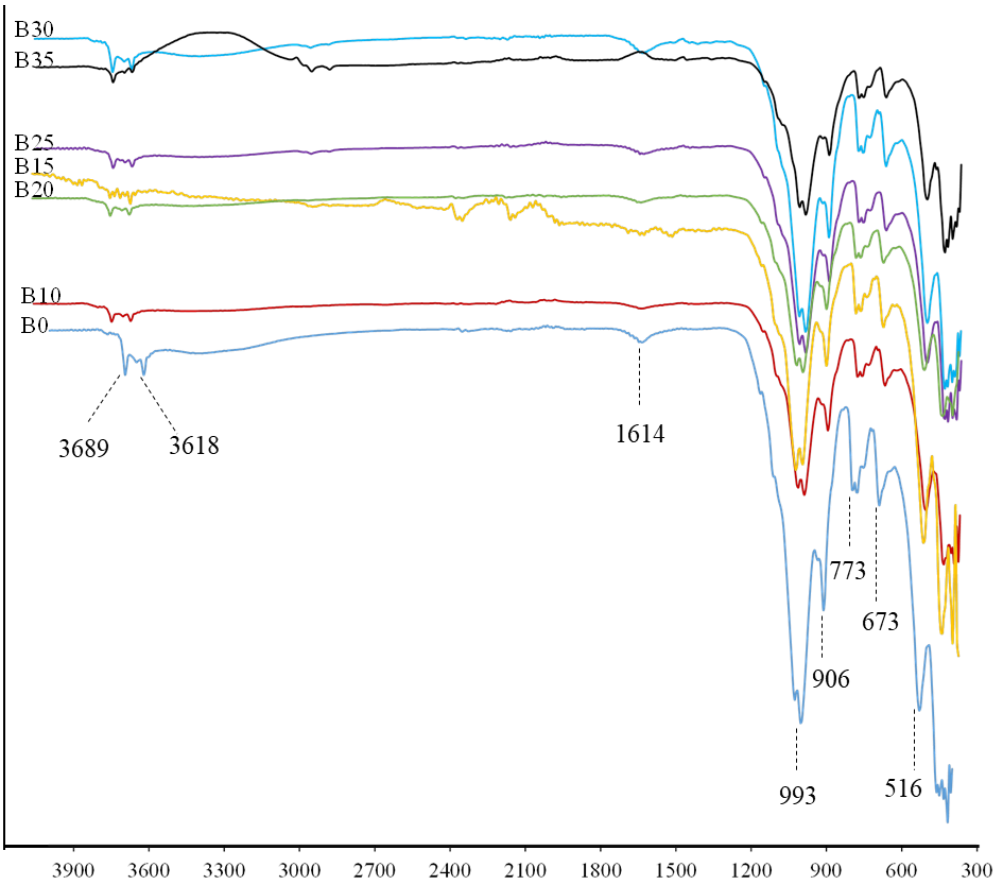

Figure 7 : spectres infrarouges des BTCs

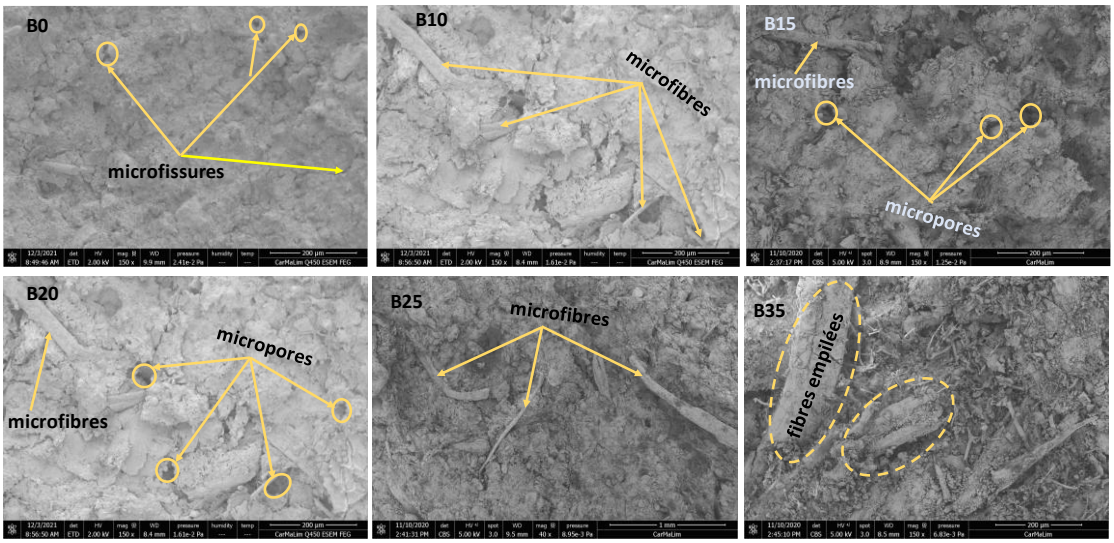

Figure 8 : Images MEB des fragments de BTCs: B0, B10, B15, B20, B25, B35

3.3. Propriétés hygrométrique et hydrique des BTCs amendés aux poudres de coques d'arachide

3.3.1. Isothermes de sorption/désorption de vapeur des BTCs

La **figure 9** montre l'évolution de la teneur en eau des six nuances (briques) soumises à des humidités relatives lors des essais d'isothermes de sorption. Les tests ont été réalisés à une température contrôlée de 20°C. Le temps mis au tracé d'une isotherme de sorption était très long. En effet, pour chaque point, il est nécessaire d'atteindre l'équilibre hydrique ce qui nécessite plusieurs semaines voire plusieurs mois. Le même constat a été fait par Cérézo et Chamoin [27]. Chaque courbe représentée est la moyenne des valeurs obtenues sur trois échantillons différents.

Les résultats montrent que l'ensemble des BTCs élaborés ont une capacité de sorption importante. La

teneur en eau d'équilibre des BTCs est comprise entre 0 et 8 % . La teneur en eau du B10 atteint 7,62 % comparativement aux briques en terre non amendées [28]. Les courbes montrent qu'en se rapprochant de la condensation (HR > 80 %), la quantité d'eau adsorbée augmente fortement. Selon certaines études, la teneur en eau de murs en terre est généralement comprise entre 0,5 et 5 % [29], pour une humidité relative inférieure à 70 %. Les BTC élaborés sont en accord avec cette étude car la teneur en eau maximale adsorbée est d'environ 3,45_% pour une humidité relative inférieure à 70%. Comme le montre la **figure 9**, les courbes de sorption des BTC non stabilisés et stabilisés possèdent la même allure mais avec différentes capacités de sorption. Les isothermes de BTC ont une forme sigmoïdale et sont classées d'après la classification de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (**IUPAC)** dans le groupe des isothermes de type II [28].

Les isothermes de types II sont beaucoup rencontrées dans les solides non poreux et macroporeux. Il s'agit d'un remplissage d'une monocouche et une montée continue de la quantité d'eau adsorbée. Ce type d'isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire. De façon générale, les quantités d'eau adsorbées augmentent avec l'augmentation de l'humidité relative. Les mécanismes de fixation de l'humidité se font en trois étapes (ou zone) :

Zone I : l'eau est adsorbée sous forme de monocouche sur la surface des pores. Ce phénomène est dû aux forces intermoléculaires de type Van der Waals agissant sur les molécules de vapeur. La phase liquide est alors discontinue tandis que la phase gazeuse est continue ;

Zone II : elle est caractérisée par la fixation d'une ou plusieurs couches (multicouche) de molécule d'eau sur la première couche adsorbée ;

Zone III : elle correspond à la condensation de l'eau dans les micros capillaires. Cette eau constitue une phase continue.

Les courbes de sorption/désorption des BTC sont données à la **figure 10**. De façon générale, les courbes ont la même allure pour les différentes nuances.

Un écart entre les courbes de sorption et de désorption est observé, comme le montre la figure 10. Cet écart est attribué au phénomène d'hystérésis dû au changement physique du matériau causé par le départ de l'eau. Selon Karoglou et al.[13] ,Wang et al.[30], cette variation s'explique par la présence des mésopores, dont le diamètre est compris entre 2 et 50 nm. Le phénomène d'hystérésis est influencé par l'ajout de PCA. En effet, la teneur en eau mesurée en désorption pour une humidité relative donnée est supérieure à celle observée en sorption. Ce phénomène traduit le fait qu'il est plus facile pour l'eau de rentrer dans le réseau poreux que d'en sortir, du fait des forces capillaires. La différence la plus importante a été constatée pour les nuances B10, pour le palier d'humidité relative de 70_% environ, elle atteint une valeur approximative de 0,25_%, qui est vingt fois inférieure à celle du béton [31]. Ce résultat montre le pouvoir hygroscopique de ces matériaux et leur contribution par la suite à la régulation hydrique de l'air intérieur du bâtiment.

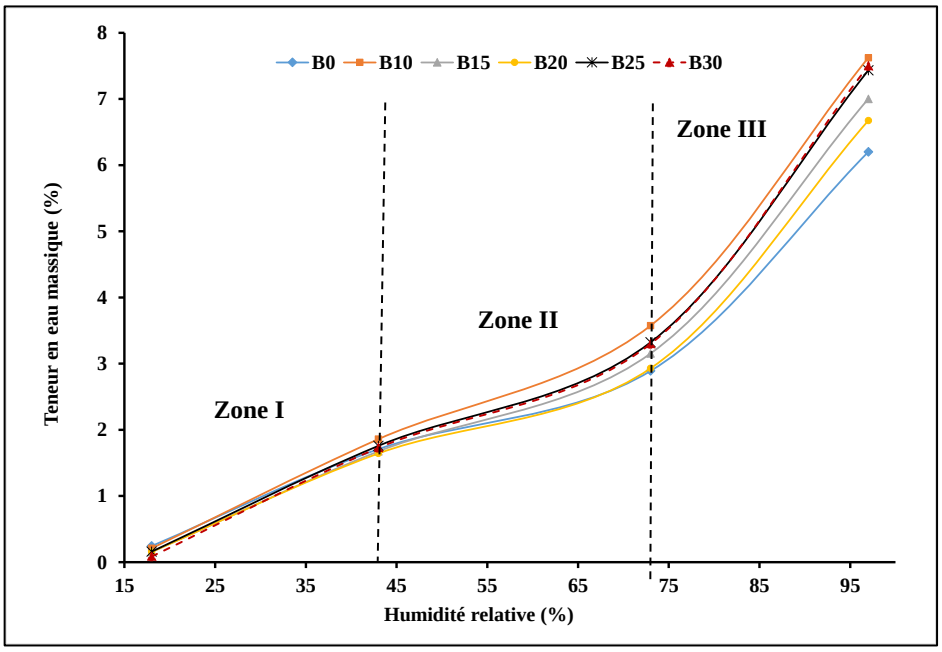

Figure 9 : Isothermes de sorption des BTC

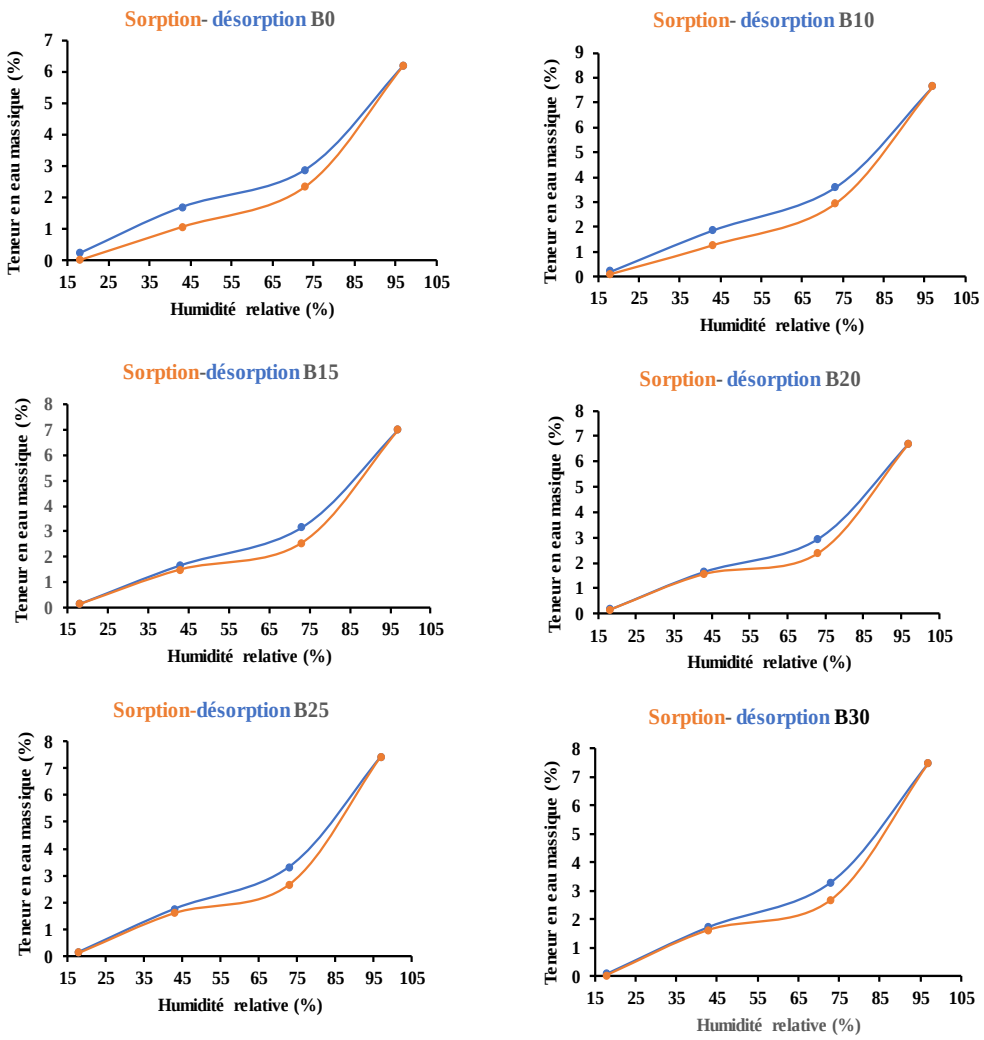

Figure 10: Isothermes de sorption / désorption des BTCs

McGregor et al [34] ont également indiqué que l'hystérésis est associée à la condensation capillaire causée par les micropores et mésopores à l'intérieur de la matrice et qu'il peut être utilisé pour évaluer le tampon d'humidité [33].Collet et al.[34] dans leurs travaux sur le béton de chanvre, ont constaté un phénomène d'hystérésis qui se poursuit aux faibles humidités relatives et, même après séchage à 70 °C. Pour eux, ce phénomène est dû à l'existence des molécules d'eau liées qui ne seraient pas évacuées à 70 °C ou à une réaction chimique entre le milieu poreux et les molécules d'eau.

Par ailleurs, nous constatons que le comportement hystérique des BTC est plus important pour les nuances B0 et B10. Ce comportement peut être lié à la grande capacité de sorption de la vapeur d'eau qui n'était pas facilement libérée au point d'inversion entre les courbes de sorption et de désorption. Par contre, les nuances dont la teneur en poudre de coques d'arachide est supérieure à 10_% présentent un phénomène d'hystérésis négligeable pour une humidité relative inférieure à 45 %. Cela s'expliquerait par le fait que l'éprouvette B10 adsorbe plus d'humidité contenue dans l'air que les autres.

Normalement, l'adsorption d'eau par la matière cellulosique crée un gonflement qui est à la base de l'hystérésis dans beaucoup de cas. Dans notre situation, le gonflement n'a pas eu lieu, certainement à cause de la force importante de compactage, réduisant alors l'hystérésis.

L'hystérésis peut être liée à la forme des pores (« bouteille ») ou à la structuration des pores (interconnections). Selon la forme et la structuration des pores dans le matériau, quatre (04) types d'hystérésis sont généralement rencontrés.

Pour les nuances B0 et B10, les branches d'adsorption et de désorption sont quasiment parallèles, ce qui nous permet de dire qu'il s'agit d'une hystérésis de type H_1. Ce type d'hystérésis permet de conclure que les BTC (B0 et B10) ont une distribution de pores cylindriques.

Pour les autres nuances (B15, B20, B25 et B30) les branches d'adsorption et de désorption ne sont plus

parallèles, pour l'adsorption, on a le phénomène de condensation capillaire dans les pores les plus larges, pour la désorption, on a le phénomène de condensation capillaire dans les pores les plus étroits. Il s'agit d'hystérésis de type H3 ou H4 car il n'y a pas de palier en fin d'adsorption et que les branches d'adsorption et de désorption ne sont pas parallèles [31]. Dans le cas d'hystérésis de type H3 ou H4, les hystérèses sont fortement dépendantes des conditions expérimentales, notamment du seuil de saturation. Avec l'augmentation de la quantité de PCA, la porosité augmente et le départ de la vapeur d'eau est plus facile. Ce qui pourrait expliquer la diminution de l'hystérésis avec l'augmentation de la teneur en PCA.

3.3.2. Mouillage-séchage

Les cycles de mouillage-séchage ont été utilisés pour évaluer la durabilité des BTC en saison hivernale face aux eaux de pluie. Les performances des BTCs après les cycles de mouillage-séchage sont évaluées couramment par le suivi de l'évolution de la résistance à la compression et de la perte de masse des BTCs. Dans le cas de la présente étude, les résistances à la compression n'ont pas pu être mesurées car l'ensemble des éprouvettes soumises à ce test s'est dégradé avant les 6 cycles de mouillage-séchage. Dès le premier cycle de mouillage-séchage (qui a duré 25 minutes), les éprouvettes contenant 15 et 20 % de poudre de coques d'arachide se sont désagrégées totalement. Ensuite, au deuxième cycle, l'éprouvette témoin s'est détruite totalement. Après le troisième cycle, le reste des éprouvettes, à savoir celles contenant 10 %, 25 %, 30 % et 35 % se désagrègent partiellement. Plusieurs auteurs ont montré que les BTCs stabilisés aux fibres végétales ont une faible durabilité à l'eau due au caractère hydrophile des fibres [35] [36]. Ce qui pourrait expliquer la désagrégation partielle des éprouvettes après 3 cycles de mouillage-séchage. Certains auteurs par contre, ont prouvé une amélioration de la tenue des BTC avec l'apport de matière végétale. Ainsi, Ouedraogo et al.[4], sur la stabilisation des briques en terre par les résidus de canne à sucre, ont montré que les briques adjuvées de 1 à 5 % en masse de résidus de canne à sucre présentent une bonne tenue à l'eau.

Bien que l'ensemble des éprouvettes ne puisse pas subir le test de résistance à la compression, il montre une amélioration sensible de la tenue à l'eau de quelques BTC stabilisés (**figure 11**).

Jusqu'au troisième cycle de mouillage-séchage l'éprouvette B10 résiste mieux par rapport aux autres. Cela pourrait être dû à la bonne adhérence entre la matrice argileuse et la poudre de coque d'arachide. Les pertes de masse (**figure 12**) suite au cycle mouillage–séchage sont de plus en plus importantes avec l'accroissement du nombre de cycle. B10 présente pour l'ensemble des trois cycles utilisés une perte maximale d'environ 5 % qui est jugée bonne. Au-delà de 20 % de PCA, les pertes sont également faibles et décroissent avec l'augmentation de la teneur en poudre. L'ajout de la poudre de coques d'arachide diminue la quantité d'argile très sensible à l'eau que les coques d'arachide. Au contact prolongé avec l'eau les BTC absorbent beaucoup d'eau et les grains d'argile sont mouillés. B10 avec une bonne densification permet de réduire la montée en eau et améliore sa résistance. Au-delà de 20 %, la PCA forme de plus en plus un réseau dense grâce à ces propriétés collantes en présence d'eau. Ces propriétés améliorent la tenue des BTC à l'eau et réduisent ainsi les pertes de masse.

Figure 11: Aspect des éprouvettes après le troisième cycle de mouillage-séchage.

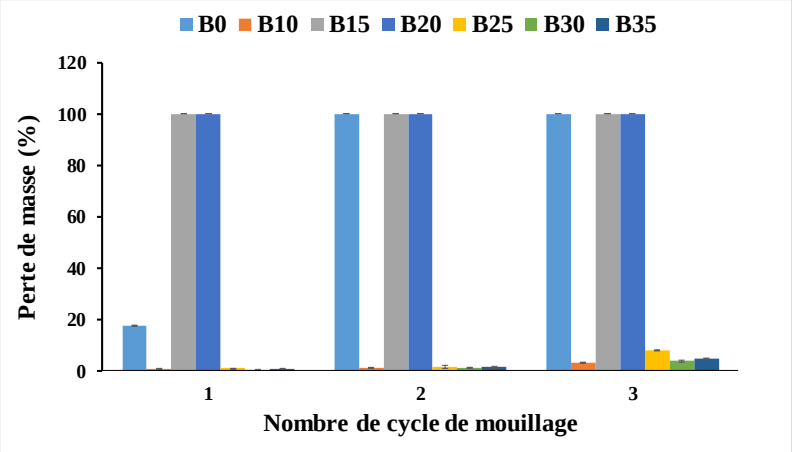

Figure 12 : Evolution de la perte de masse des BTC avec les cycles de mouillage-séchage

3.3.3. Perméabilité hydrique des BTC

La perméabilité hydrique des BTCs, illustrée à la **figure 13**, diminue considérablement à mesure que la teneur en PCA augmente. Cette tendance générale pourrait s'expliquer d'une part par l'effet filler des poudres de coque d'arachide qui obstrue les pores internes des BTCs et d'autre part par leur capacité de rétention d'eau, réduisant ainsi la circulation d'eau.
Cependant, au-delà d'un taux de 20 % en masse de PCA, une légère remontée de la perméabilité est observée. Cette inversion peut être attribuée à la microstructure plus hétérogène des formulations B25, B30 et B35, comme le confirment les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB).

Globalement, les valeurs de perméabilité mesurées se situent entre 10^{-9} m/s et 10^{-5} m/s, ce qui permet de classer l'ensemble des BTCs testés comme semi-perméables [28], [37]. Parmi les différentes formulations, la nuance B20 se distingue par une perméabilité particulièrement faible, inférieure de 85 % à celle du témoin, ce qui corrobore les observations MEB.
La perméabilité hydrique dépend étroitement de la connectivité entre les pores du matériau. Comme le souligne **Bogas et al.,** [38] un matériau peut posséder une forte porosité tout en affichant une faible perméabilité si ses pores sont mal interconnectés. Pour les BTCs stabilisés, le coefficient de perméabilité hydrique varie de $4{,}15.10^{-8}$ m/s pour le B10 à $2{,}81.10^{-8}$ m/s pour le B30. En revanche, le BTC incorporant 20 % de PCA présente un coefficient de $1{,}11.10^{-8}$ m/s, nettement inférieur à celui des autres formulations. Cette faible valeur traduit une meilleure connectivité interstitielle, confirmée par les observations en microscopie électronique à balayage (MEB).
Des études comparatives montrent des écarts liés aux conditions de fabrication : **Ricardo et al** [39]., ont obtenu des coefficients plus élevés, probablement en raison d'une pression de compactage moins élevée (3,5 MPa) dans la production, tandis que **Bahar et al** [40]., ont obtenu un coefficient plus faible ($0{,}27.10^{-8}$ m/s) , attribué à la nature et au type de liant utilisé.

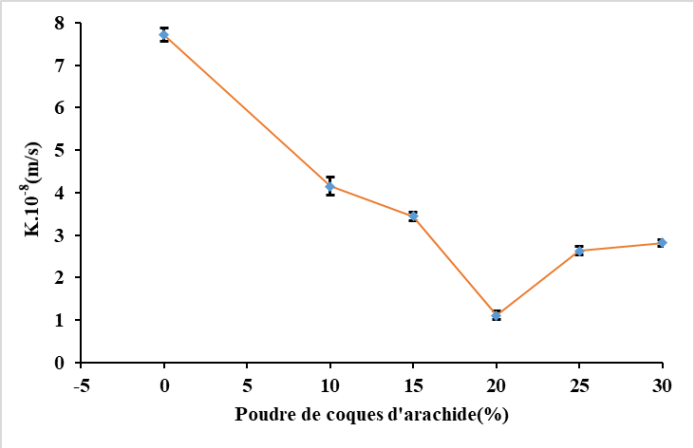

Figure 13 : Evolution de la perméabilité hydrique des BTC

3.4. Discussion

Plusieurs auteurs ont tenté de développer différents types de tests de durabilité sur des BTC: test de précipitation [41], chambre de simulation climatique [42], test d'absorption d'eau par capillarité, d'immersion complète et de gel-dégel [43], test d'égouttement [44], test de vieillissement [45], etc. Dans notre étude, la durabilité a été mesurée grâce aux tests de sorption-désorption, de mouillage-séchage et de perméabilité hydrique. Ces tests ont été choisis car il s'agit de tests essentiels pour mesurer la durabilité d'un BTC face à l'action de l'eau. Ces tests de durabilité sont également plus adaptés à nos réalités existentielles. A l'issue de ces tests plusieurs observations ont été faites :

- au niveau de la sorption- désorption l'ensemble des BTCs élaborés ont une capacité d'absorption d'eau très importante (0,2 à 7,9 %), principalement en raison de leur porosité élevée et de leur caractère hydrophile avec l'ajout de la PCA. La nuance B10 a un pouvoir de sorption plus important par rapport aux autres nuances, à différents taux d'humidité relative. Cela peut s'expliquer par l'effet combiné du caractère hydrophile de la PCA et à la quantité d'argile qu'elle contient par rapport aux autres nuances. Ce comportement du BTC B10 est probablement lié à la valeur de bleu de méthylène (4,4 g/100 g d'échantillon). Woodruff et al dans leur travaux sur la capacité d'échange cationique des argiles, ont montré que l'absorption d'eau des argiles est liée à leur activité et donc à la valeur au bleu de méthylène [46]. Le phénomène d'hystérésis mis en évidence est attribuable à beaucoup de mécanismes, mais les phénomènes les plus fréquents décrits dans la littérature sont l'effet bouteille d'encre ou la différence de l'angle de contact à l'adsorption et la désorption [47].
- au niveau du mouillage /séchage, la résistance à la compression de l'ensemble des BTC après le cycle de mouillage/ séchage alterné n'a pas été réalisée car l'ensemble des BTC élaborés se sont désagrégés avant les six cycles de mouillage/séchage recommandé par la norme ASTM (2003) [48] **.** Pour pallier à ce problème plusieurs auteurs ont exploré d'autres stabilisants.
- enfin au niveau de la perméabilité hydrique nous constatons une diminution de 63,55 % de la perméabilité hydrique jusqu'à une teneur optimale en PCA (20 % en masse). Après cette diminution, nous assistons à une légère augmentation de la perméabilité due à l'hétérogénéité des BTCs contenant plus de 20 % en masse de PCA. Ce qui montre que la stabilisation des BTCs par la PCA pourrait conduire à une meilleure perméabilité hydrique et donc à une meilleure durabilité.

4. Conclusion

Cette étude s'est intéressée aux blocs de terre comprimée (BTC) amendés à la poudre de coques d'arachide. Leur comportement hygrométrique et hydrique a été évalué afin de mieux cerner l'influence de cette stabilisation sur leurs propriétés. Il ressort des résultats obtenus les conclusions suivantes :

- une valeur très élevée de la perméabilité à la vapeur d'eau du BTC non adjuvé. On note une forte capacité de la terre à équilibrer l'humidité de l'air, qui semble être augmentée par l'ajout des agrégats végétaux (poudre de coques d'arachide). Le BTC adjuvé à 10_% en masse de PCA présente le meilleur résultat car il a un pouvoir de sorption plus importante que les autres nuances et contient moins de pores ;
- tous les BTCs testés au cycle de mouillage séchage sont se désagrégés avant les six cycles de mouillage séchage. Le BTC adjuvé à 10 % de PCA présente le bon résultat en restant sous l'eau sans se désagréger jusqu'au troisième cycle de mouillage séchage de 3x25 min ;
- une diminution de la perméabilité hydrique est observée avec l'augmentation de la teneur en poudre de coques d'arachide. La perméabilité moyenne de l'ensemble des BTCs est comprise entre 10^{-9} m/s et 10^{-5} m/s. Le meilleur résultat est obtenu avec le BTC adjuvé à 20_% en masse de poudre de coques d'arachide.

Au regard de l'amélioration des propriétés hygrométrique et hydrique des BTCs, le composite contenant 10_% de PCA convient pour la construction d'habitats durables. D'autres études de durabilité (l'effet de température, les pluies acides, la diffusion à la vapeur…) feront l'objet de futurs travaux afin d'évaluer l'impact des PCA à long terme sur les BTCs.

5. Références

[1] A. B. Laibi, P. Poullain, N. Leklou, M. Gomina, and D. K. C. Sohounhloué, "Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB)," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 785–793, 2018, doi: 10.1007/s12205-017-1968-9.

[2] Nassio Sory, Moussa Ouedraogo, Adamah Messan, Issiaka Sanou, Moustapha Sawadogo, Kouka Jeremy Ouedraogo, Halidou Bamogo, Ouanmini Bobet, Lamine Zerbo, Mohamed Seynou., "Mechanical, Thermal and Hydric Behavior of the Bio-sourced Compressed Earth Block (B-CEB) Added to Peanut Shells Powder,"

Adv. Mater., vol. 11, no. 1, p. 1, 2022, doi: 10.11648/j.am.20221101.11.

[3] O. Bobet, M. Seynou, L. Zerbo, H. Bamogo, I. Sanou, and M. Sawadogo, "Propriétés mécanique, hydrique et thermique de briques en terre crue amendées aux coques d'arachide," *J. Soc. Ouest-Afr. Chim*, pp. 54–64, 2020, [Online]. Available: http://www.soachim.orgj.soc.ouest-afr.chim.

[4] Moussa Ouedraogo , Halidou Bamogo, Issiaka Sanou, Vanessa Mazars, Jean-Emmanuel Aubert,Younoussa Millogo. "Microstructural, Physical and Mechanical Characteristics of Adobes Reinforced with Sugarcane Bagasse," *buildings*, vol. 13, no. 1, p. 117, 2023, doi: https://doi.org/10.3390/buildings 13010117.

[5] Issiaka Sanou, Moussa Ouedraogo, Halidou Bamogo, Namory Meité, Mohamed Seynou, Jean-Emmanuel Aubert, Younoussa Millogo, "Microstructural, physical, and mechanical characteristics of adobes amended with cement-metakaolin mixtures," *Emergent Mater.*, vol. 7, no. 3, pp. 1203–1217, 2024, doi: 10.1007/s42247-024-00638-9.

[6] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. B. Williams, "Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 797–809, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069.

[7] K. Dao, M. Ouedraogo, Y. Millogo, J. E. Aubert, and M. Gomina, "Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 84–96, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001.

[8] A. W. Bruno, B. Scott, Y. D'Offay-Mancienne, and C. Perlot, "Recyclability, durability and water vapour adsorption of unstabilised and stabilised compressed earth bricks," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 53, no. 6, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1617/s11527-020-01585-7.

[9] H. Bamogo, M. Ouedraogo, I. Sanou, K. Amed, and J. Ouedraogo, "Improvement of water resistance and thermal comfort of earth," *J. Cult. Herit.*, vol. 46, pp. 42–51, 2020, doi: 10.1016/j.culher.2020.04.009.

[10] I. Sanou, M. Sawadogo, M. Seynou, and L. Zerbo, "Study of the Mechanical Behaviour of Mortars Modified with Rice Husk Ash," *ournal Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 7, pp. 373–384, 2019, doi: 10.4236/jmmce.2019.76025.

[11] M. Ouedraogo *et al.*, "Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (Digitaria exilis) straw," *J. Build. Eng.*, vol. 23, no. May 2018, pp. 250–258, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.02.005.

[12] A. Koutous and E. Hilali, "Reinforcing rammed earth with plant fibers: A case study," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00514, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00514.

[13] M. Karoglou, A. Moropoulou, Z. B. Maroulis, and M. K. Krokida, "Water sorption isotherms of some building materials," *Dry. Technol.*, vol. 23, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 289–303, 2005, doi: 10.1081/DRT-200047948.

[14] *AFNOR, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions, spécifications, méthodes d'essai et conditions de réception, Association française de normalisation, XP P13-901, (2001).*

[15] Y.Millogo, *Stabilisation des matériaux Locaux par des liants Minéraux, Application au Génie Civil.*, Editions U. 2012.

[16] S. L. et R. C. M. Audiguier, Z. Geremew, "Laboratory characterization of clayed soils to shrinkage-swelling susceptibility," *Rev. Fr. Geotech.*, pp. 67–82, 2007, doi: https://doi.org/10.1051/geotech/2007120067.

[17] A. E. Griel, B. Eissenstat, P. M. Kris-Etherton, G. Hsieh, and V. Juturu, "Improved Diet Quality with Peanut Consumption," *J. Am. Coll. Nutr.*, vol. 23, no. 6, pp. 660–668, 2004, doi: 10.1080/07315724.2004.10719408.

[18] C. L. Revoredo and S. M. Fletcher, "World Peanut Market," *Natinal Cent. Peanut Compet.*, p. 22, 2002.

[19] *NF EN ISO 12571. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*. 2013.

[20] F. Ntimugura, S. O. Sore, L. Bello, and A. Messan, "The Influence of Metakaolin from Saaba (Burkina Faso) over Physico-Mechanical and Durability Properties of Mortars," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 07, no. 03, pp. 389–408, 2017, doi: 10.4236/ojce.2017.73027.

[21] E. I. 17892-11:2019, *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11: Permeability tests*. 2019.

[22] A. M. Qtaitat. and N.I. Al-Trawneh., "Characterization of kaolinite of the Baten ELGhoul region/south Jordan by infrared spectroscopy," *Spectrochim. Acta Part A*, vol. 61, p. 1519-1523, 2005.

[23] G. P. J. B. Saikia, "Fourier transform infrared spectroscopic characterization of kaolinite from Assam and Meghalaya, Northeastern India," *J. Mod. Phys.*, vol. 1, pp. 206–210, 2010.

[24] T. Diadi, Y. Sawadogo, B. Sorgho, and M. Sawadogo, "Valorization of Glass Bottles in the Manufacture of Fired Compressed Earth Bricks (CEB)," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 44–62, 2025, doi: 10.4236/jmmce.2025.132004.

[25] S. Benyoucef, D. Harrache, and B. A. Algérie, "Caractérisation de la microstructure de sciure de bois de pin sylvestre " Pinus sylvestris ' ' [Microstructure characterization of scots pine " Pinus sylvestris " sawdust]," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 765–772, 2015.

[26] Ouanmini Bobet, Sory Nassio, Mohamed Seynou, Bakiono Remy, Lamine Zerbo, Issiaka Sanou,

Moustapha Sawadogo, Younoussa Millogo, Escadeillas Gilles, "Characterization of Peanut Shells for Their Valorization in Earth Brick," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 08, no. 04, pp. 301–315, 2020, doi: 10.4236/jmmce.2020.84018.

[27] V. Cerezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique Institut National des Sciences Appliquées de Lyon , France.," Université Gustave Eiffel, 2005. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/37813495

[28] J. L. Jiang, Bin, Tao Wu, Wenjing Xia, "Hygrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous Prefecture in Sichuan Province of China," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, p. 107128, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107128.

[29] M. Moevus, R. Anger, and L. Fontaine, "Hygro-Thermo-Mechanical Properties of Earthen Materials for Construction : a Literature Review," 2012.

[30] J. Wang, M. H. N. Yio, T. Zhou, H. S. Wong, C. T. Davie, and E. Masoero, "Water sorption isotherms and hysteresis of cement paste at moderately high temperature, up to 80 °C," *Cem. Concr. Res.*, vol. 165, no. December 2022, p. 107076, 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107076.

[31] V. Baroghel-Bouny, "Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials: Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 414–437, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.019.

[32] A. S. F. McGregor, A. Heath, E. Fodde, "Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks," *Build. Env.*, vol. 75, pp. 11–18, 2014.

[33] F. McGregor, A. Heath, A. Shea, and M. Lawrence, "The moisture buffering capacity of unfired clay masonry," *Build. Environ.*, vol. 82, pp. 599–607, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.09.027.

[34] J. M. F. Collet, M. Bart, L. Serres, "Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp. 1271–1280, 2008.

[35] A. Seco, P. Urmeneta, E. Prieto, S. Marcelino, B. García, and L. Miqueleiz, "Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 600–605, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107.

[36] A. B. Laibi *et al.*, "Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin en vue de leur valorisation dans l'éco-construction," *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 499, 2017, doi: 10.4314/ijbcs.v11i1.40.

[37] C. Yves, *Propriétés des matériaux de construction.*, MONITEUR. 2019.

[38] J. A. Bogas, M. Silva, and M. Glória Gomes, "Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 13, no. 4, pp. 569–584, 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1442891.

[39] R. Cruz, J. A. Bogas, A. Balboa, and P. Faria, "Water Resistance of Compressed Earth Blocks Stabilised with Thermoactivated Recycled Cement," *Materials (Basel).*, vol. 17, no. 22, 2024, doi: 10.3390/ma17225617.

[40] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, 2004, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.

[41] H. B. F. O. Ogunye, "Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, pp. 173–180, 2002.

[42] M.R. Hall, "Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber," *Build. Environ.*, vol. 42, p. 139-145, 2005.

[43] L.Guerin, *Construction à faible cout dans les programmes speciaux de travaux publics : Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue*. 1985.

[44] K. A. Heathcote, "Durability of earthwall buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 9, no. 3, 1995.

[45] A. A. & H. H. A. Guettala, "Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, pp. 119–127, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001.

[46] W. F. Woodruff and A. Revil, "CEC-normalized clay-water sorption isotherm," *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 11, pp. 1–15, 2011, doi: 10.1029/2011WR010919.

[47] E. S. Meriem Saidia, Amel Soukaina Cherif, Belkacem Zeghmati, "Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks," *Constr. Build. Mater.*, no. 167, pp. 566–577, 2018.

[48] ASTM. ASTM : D 559-96, *Standard method of wetting and drying test of compacted soil cement mixture*. 2003.