

Effet de la masse volumique sur la conductivité thermique et la valeur tampon hygrique de blocs de terre compactée

Nancy Hamieh¹, Florence Collet¹, Amina Meslem¹, Damien Rangeard², Tangi Le Borgne²

¹ Université de Rennes, Laboratoire GCGM, Rennes, France

² Laboratoire CBTP, Département Recherche & Développement, Noyal-Sur-Vilaine, France

RESUME La terre crue est un matériau de construction qui a le potentiel de réduire l'empreinte environnementale des projets de construction. Elle nécessite une moindre consommation d'énergie pour la fabrication et pourra être réutilisable à la fin de son cycle de vie si elle n'est pas stabilisée. La technique des blocs de terre compactée est considérée comme une évolution moderne dans la construction traditionnelle en terre. L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet de la masse volumique sur la conductivité thermique et la valeur tampon hygrique des blocs de terre compactée. Dans ce cadre, des échantillons cylindriques de terre compactée et non stabilisée élaborés par le Laboratoire CBTP sont fabriqués à partir de fines issues des carrières à trois masses volumiques cibles comprises entre 1,90 et 2,15 g/cm³. Les mesures de conductivité thermique sont effectuées à l'état sec en utilisant la méthode du fil chaud en régime transitoire. Les résultats expérimentaux montrent une corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique des blocs de terre compactée avec des valeurs qui varient de 0,8 et 1,1 W/(m.K). La valeur tampon hygrique est mesurée selon le protocole NORDTEST. Les résultats soulignent le potentiel des blocs de terre compactée comme des bons régulateurs d'humidité selon la classification NORDTEST.

Mots-clés Terre crue, Caractérisation thermique, MBV

I. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, l'intérêt pour les éco-matériaux durables a augmenté en raison de la nécessité de réduire les émissions de carbone et l'impact environnemental des matériaux de construction (Ibn-Mohammed et al., 2013; Praseeda et al., 2016). Parmi les alternatives prometteuses on trouve les matériaux à base de terre, la terre crue étant un matériau recyclable avec une faible énergie grise (Keefe, 2005; Morel et al., 2001). Une technique traditionnelle largement utilisée est la fabrication de Blocs de Terre Compactée "BTC" (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). Cette technique nécessite moins de 10 % de l'énergie requise pour produire des unités de maçonnerie en argile cuite et en béton équivalentes (Walker, 1995).

En outre, les matériaux à base de terre présentent des propriétés thermiques et hygriques intéressantes. Leur inertie thermique élevée (Brambilla and Jusselme, 2017), liée à une capacité de stockage élevée (Collet et al., 2006; Soudani et al., 2017; Taylor and Luther, 2004), permet de réguler passivement les températures à l'intérieur des bâtiments, contribuant ainsi à un confort thermique

optimal pour les occupants. Cependant, il convient de noter que la masse volumique élevée de la terre crue peut également entraîner des transferts thermiques élevés (Gaillard, 2022; Mansour et al., 2016), ce qui peut avoir un impact négatif sur les performances énergétiques des bâtiments en termes d'isolation.

Par ailleurs, les matériaux à base de terre présentent également des propriétés hygroscopiques importantes. Les micro- à nanopores et la composition argileuse de la terre crue (Fabbri et al., 2019; Murad et al., 1995) lui confèrent une valeur tampon hygrique importante (Fabbri and Morel, 2016; Hall and Allinson, 2009). Une forte hygroscopicité conduit à une inertie thermique élevée due à la forte capacité de l'eau, et les échanges hygriques induisent un stockage et une libération de chaleur latente lors de l'adsorption et de la désorption de l'eau (Bruno et al., 2018). Ces propriétés de régulation passive apportées par les constructions en terre améliorent le confort et la santé des occupants tout en réduisant les besoins énergétiques des bâtiments.

Dans cette étude, l'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique et la valeur tampon hygrique de blocs de terre non stabilisée "BTC" est examinée.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Matières premières, formulation et production

Les BTC non stabilisée de cette étude sont composés de fines et de sable. La matrice fine est une boue argileuse produite par le lavage de sable provenant d'une carrière. Les propriétés de cette matrice fine sont caractérisées par le laboratoire CBTP dans le cadre de sa valorisation dans les constructions en terre crue. Elle est principalement composée de limon, avec plus de 80 % de ses particules dans la plage de $63 \mu\text{m}$ à $2 \mu\text{m}$ et environ 9 % d'argile. Elle est classifiée dans la catégorie des sols sableux-argileux selon sa valeur au bleu de méthylène de 1,9. Le sable utilisé est un sable standard classé 0-4.

Une même formulation est utilisée pour fabriquer des BTC avec trois masses volumiques sèches cibles différentes : 1,90, 2,00 et 2,15 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ et désignés par le symbole $\text{BTC}-\rho_d$ où ρ_d est la masse volumique sèche cible correspondante. Les échantillons cylindriques sont produits par le laboratoire CBTP à l'aide d'une presse hydraulique avec un moule de 10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur (FIGURE 1).

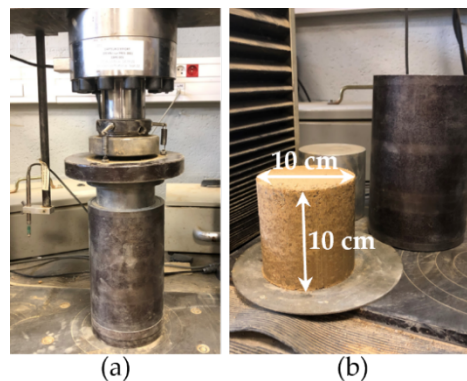


FIGURE 1. Production des échantillons : presse hydraulique (a) et BTC (b)

Tout d'abord, le sable (70 % en masse) et les fines (30 % en masse) sont mélangés à sec dans un malaxeur pour assurer une distribution uniforme des particules solides. Ensuite, la quantité nécessaire d'eau est ajoutée progressivement en poursuivant le malaxage jusqu'à obtenir une bonne homogénéité du mélange (avec un rapport massique eau/particules solides de 0,09). La quantité de mélange humide requise pour atteindre la masse volumique cible est ensuite introduite dans le moule et compactée avec un effort de compactage d'environ 6,4 MPa. Douze échantillons sont produits pour la masse volumique 1,9 et quinze pour chacune des masses volumiques 2,00 et 2,15. Après la fabrication, les échantillons sont stockés et stabilisés dans une armoire climatique régulée à 23 °C et 50 %HR jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte. Ensuite, ils sont séchés à l'étuve à 50 °C, avec du gel de silice ajouté pour maintenir une humidité relative d'environ 1 à 3 % à l'intérieur de l'étuve. La stabilisation de la masse est atteinte lorsque la variation de masse est inférieure à 0,1 % entre deux pesées avec un intervalle de 24 heures pour trois pesées consécutives.

B. Mesures des masses volumiques et de la porosité

La masse volumique apparente ρ_{app} est calculée à partir du rapport entre la masse de l'échantillon et son volume. La masse de chaque échantillon est mesurée à l'aide d'une balance analytique (Sartorius CPA4202S) avec une précision totale de 0,04 g. Le volume de l'échantillon est obtenu à partir de la moyenne de cinq mesures pour chaque dimension, prises avec un pied à coulisse numérique IP67 avec une précision de 0,01 mm. Après stabilisation à 23 °C, 50 %HR, les masses volumiques apparentes sont mesurées pour tous les échantillons fabriqués et une moyenne est calculée pour chaque BTC- ρ_d . Les échantillons endommagés sont exclus du panel et de même pour ceux dont la masse volumique apparente est située en dehors de la plage de la moyenne correspondante \pm l'écart type car ils sont considérés non représentatifs. Ainsi 10 échantillons sur 12 sont conservés pour BTC-1,90, 14 sur 15 pour BTC-2,00 et 12 sur 15 BTC-2,15. La plage de masse volumique représentative est définie comme la moyenne de masse volumique apparente \pm l'écart type du panel conservé pour chaque BTC- ρ_d .

La masse volumique réelle des particules solides ρ_s est mesurée par la méthode du pycnomètre (EN ISO 11508, 2017). Un échantillon de chaque BTC- ρ_d est écrasé et broyé avec un broyeur à billes. Après séchage à l'étuve à 50 °C, il est placé dans un pycnomètre de 250 ml et immergé dans un liquide chimiquement inerte : le toluène. Le pycnomètre est régulièrement agité jusqu'à ce que toutes les particules se déposent au fond et qu'aucune bulle ne soit visible. Le pycnomètre est ensuite entièrement rempli de toluène. Les pesées successives permettent de calculer la masse volumique réelle à l'aide de l'équation (1). Pour chaque BTC- ρ_d , l'échantillon broyé est réparti sur cinq pycnomètres et la masse volumique réelle correspond à la moyenne des cinq mesures.

$$\rho_s = \frac{m_{ech}}{V_{ech}} = \frac{m_{ech}}{V_{pycno} - V_{toluène}} = \frac{m_2 - m_1}{\frac{m_4 - m_1}{\rho_{eau}} - \frac{m_3 - m_2}{\frac{(m_5 - m_1)\rho_{eau}}{m_4 - m_1}}} = \frac{(m_2 - m_1)(m_5 - m_1)\rho_{eau}}{(m_4 - m_1)(m_5 - m_1 - m_3 + m_2)} \quad (1)$$

Où m_1 est la masse du pycnomètre vide, m_2 celle du pycnomètre contenant l'échantillon, m_3 celle du pycnomètre rempli de toluène contenant l'échantillon, m_4 celle du pycnomètre rempli d'eau et m_5 celle du pycnomètre rempli de toluène.

La porosité totale n est ensuite calculée à partir de la masse volumique apparente sèche ρ_{app_sec} (mesurée après séchage à 50 °C) et de la masse volumique réelle ρ_s en utilisant l'équation suivante :

$$n = \frac{\rho_s - \rho_{app_sec}}{\rho_s} \quad (2)$$

B. Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété fondamentale qui caractérise la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Dans cette étude, elle est mesurée avec la méthode transitoire du fil chaud à l'aide d'un dispositif commercial : le CT-mètre. Cette méthode est basée sur l'analyse de l'évolution de la température en fonction du temps de chauffage, liée à la conductivité thermique suivant l'équation suivante :

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln(t) + C) \quad (3)$$

Où ΔT est l'élévation de température [$^{\circ}\text{C}$], q le flux de chaleur [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$], λ la conductivité thermique du matériau [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], t le temps de chauffage [s] et C une constante qui inclut la diffusivité thermique du matériau et la résistance de contact.

Le fil chaud a une longueur de cinq centimètres. Il est placé entre deux BTC avec le meilleur contact possible entre les surfaces. La puissance de chauffage de 0,851 W et le temps de chauffage de 100 s sont choisis de manière à atteindre une élévation de température suffisante [$> 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$] et un coefficient de corrélation $R^2 > 0,99$ entre les valeurs expérimentales et la courbe d'ajustement fournie par l'équation (3).

Pour chaque BTC- ρ_d , trois paires sont testées. Pour chaque paire, la mesure est répétée au moins cinq fois à différentes positions du fil chaud, assurant la représentativité de la conductivité thermique. La valeur de chaque paire est calculée comme la moyenne de cinq mesures avec un coefficient de variation inférieur à 5 %. La conductivité thermique de chaque BTC- ρ_d est ensuite calculée en faisant la moyenne des valeurs obtenues pour les trois paires correspondantes.

La conductivité thermique est mesurée à $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ au point sec après séchage à $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et refroidissement dans un dessiccateur, où les mesures sont effectuées.

B. Mesure de la valeur tampon hygrique

La valeur tampon hygrique (ou MBV pour Moisture Buffer Value) définit la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité ambiante.

Les mesures sont réalisées conformément aux recommandations de la méthode du projet NORDTEST (Rode et al., 2005). Après stabilisation à $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 %HR, les échantillons sont soumis à des cycles quotidiens d'humidité relative avec une température constante de $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dans une armoire climatique Vötsch VC4060. Ces cycles consistent en 8 heures à une humidité relative élevée de 75 %, suivies de 16 heures à une humidité relative faible de 33 %. Les échantillons sont pesés cinq fois pendant la phase d'adsorption et quatre fois pendant la phase de désorption. Les cycles sont répétés jusqu'à ce que la variation de masse et de MBV entre les trois derniers cycles soit inférieure à 5 %. Le MBV de chaque phase est ensuite calculé en utilisant l'équation (4). Le MBV de chaque échantillon est la moyenne des MBV calculées au cours des phase d'adsorption et de désorption pour les trois derniers cycles.

$$\text{MBV} = \frac{\Delta m}{A(\text{HR}_{\text{haute}} - \text{HR}_{\text{basse}})} \quad (4)$$

Où MBV est la valeur de tampon hygrique [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$], Δm la quantité d'eau échangée par sorption/désorption pendant la phase du cycle [g], A la surface d'échange du matériau [m^2], HR_{haute} et HR_{basse} les humidités relatives haute et basse au cours du cycle [%HR].

Le protocole NORDTEST a été évalué au cours d'un test Round Robin effectué sur divers matériaux de construction tels que le béton, la brique, le béton cellulaire, le plâtre, le bois, etc. Suite à cette évaluation, une classification des valeurs du tampon hygrique des matériaux de négligeable à excellente a été élaborée (Figure 2).

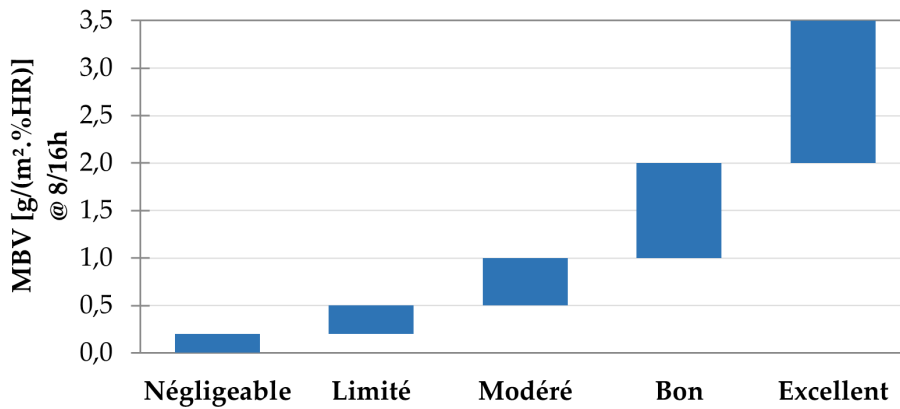


Figure 2. Classification des valeurs tampon hygrique selon le NORDTEST Project (Rode et al., 2005)

Dans cette étude, les échantillons sont étanchés avec du scotch aluminium appliqué sur le fond et la surface latérale pour assurer un transfert unidirectionnel de la vapeur à travers la surface exposée de chaque échantillon. Des grilles et des plaques perforées sont utilisées pour limiter la vitesse d'air et homogénéiser l'écoulement d'air à l'intérieur de l'armoire climatique (Figure 3a). La vitesse d'air est mesurée à 1 cm au-dessus du centre de chaque échantillon à l'aide d'un anémomètre à boule chaude afin de vérifier la conformité avec la recommandation NORDTEST, fixée à $0,1 \pm 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 3b). Pour chaque BTC- ρ_d , la valeur tampon hygrique correspond à la moyenne des valeurs des trois échantillons correspondants.

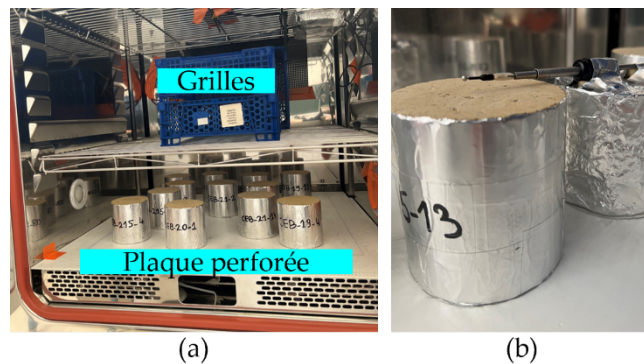


Figure 3. Banc expérimental (a) et mesure de la vitesse d'air (b)

III. Résultats et discussion

A. Masses volumiques apparente et réelle - porosité

La Figure 4 donne les masses volumiques apparentes moyennes de l'ensemble des échantillons du panel conservé de chaque BTC- ρ_d et celles des échantillons sélectionnés pour les mesures de conductivité thermique et de valeur tampon hygrique. Pour chaque BTC- ρ_d , les résultats montrent des coefficients de variation très faibles (< 1 %). Cela souligne la répétabilité de la production. Les masses volumiques cibles sont atteintes avec un écart de moins de 2 %. Pour chaque BTC- ρ_d , les trois paires sélectionnées pour les tests de conductivité thermique et les trois échantillons sélectionnés pour les tests MBV sont représentatifs en termes de masse volumique, comme le montre la Figure 4.

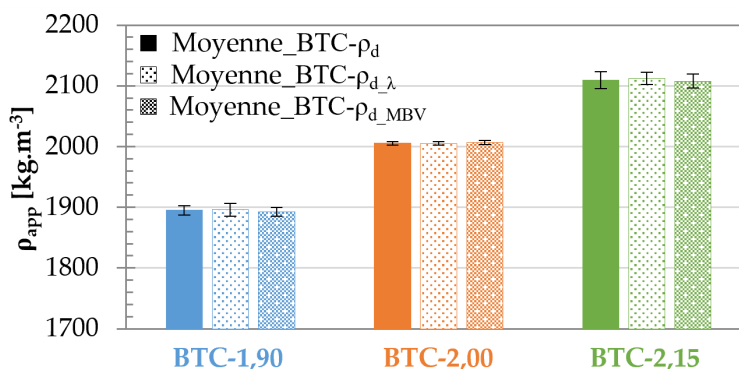


Figure 4. Masses volumiques apparentes moyennes et écarts type de l'ensemble des échantillons de chaque BTC- ρ_d (ρ_d) et des échantillons sélectionnés pour la mesure de la conductivité thermique ($\rho_{d,\lambda}$) et de la valeur tampon hygrique ($\rho_{d,MBV}$)

Comme attendu, les masses volumiques réelles mesurées pour les trois BTC- ρ_d sont identiques, avec un coefficient de variation de 1,1 %, puisqu'ils ont la même formulation. Ainsi, en faisant la moyenne des trois valeurs obtenues, la masse volumique réelle est égale à 2660,9 kg/m³. Le Tableau 1 donne les moyennes des masses volumiques sèches et les porosités des BTC sélectionnés pour les tests.

Tableau 1. Masses volumiques apparentes sèches et porosités totales des échantillons testés

	BTC-1,90	BTC-2,00	BTC-2,15
ρ_{app_sec}			
$\pm \rho_{app_sigma}$	1885,6 ± 8,5	1995,8 ± 3,3	2100,9 ± 9,1
[kg/m ³]			
n [%]	29,1	25,0	21,0

B. Conductivité thermique

La Figure 5 montre une évolution linéaire croissante de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente mesurée au point sec. Elle varie entre 0,8450 et 1,1318 W/(m.K) pour des masses volumiques sèches comprises entre 1886,8 et 2102,7 kg/m³. BTC-2,15 a la conductivité thermique la plus élevée du fait de sa masse volumique plus élevée et donc sa porosité plus faible. Cette évolution est similaire à celles rapportées pour des blocs de terre compactée non stabilisée

(Mu et al., 2023; Zhang et al., 2020). Toutefois, les valeurs de conductivité diffèrent de celles de la littérature probablement en lien avec la formulation. Une augmentation de la teneur en argile dans le matériau a tendance à diminuer sa conductivité thermique (Mu et al., 2023).

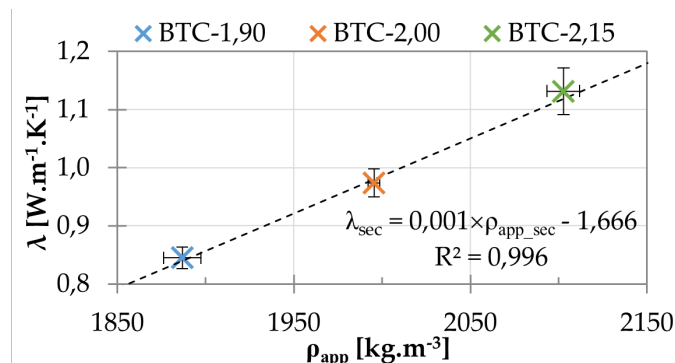


Figure 5. Conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente au point sec

C. Valeur tampon hygrique

La Figure 6 présente à titre d'exemple la cinétique de masse de l'échantillon BTC-2,00-1 pendant le test MBV, ainsi que les conditions de l'humidité relative ambiante dans la chambre climatique au cours de l'essai. Les pics d'humidité relative affichés sur la courbe correspondent aux perturbations causées par l'ouverture régulière de la porte de l'armoire climatique lors des pesées des échantillons. Les conditions se restabilisent rapidement après fermeture de la porte. L'état d'équilibre est atteint à partir du troisième cycle pour tous les échantillons testés.

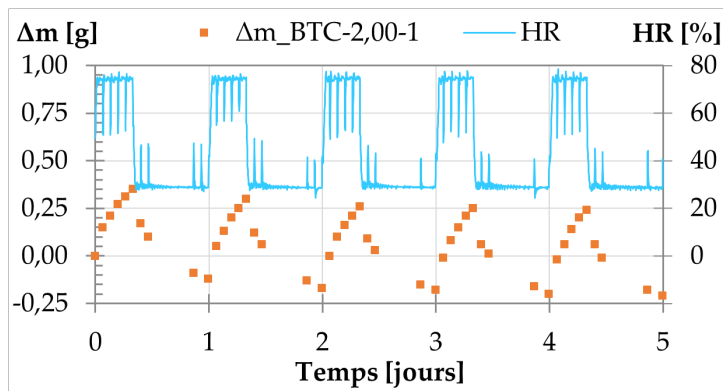


Figure 6. Humidité relative durant le test MBV et cinétique de masse de l'échantillon BTC-2,00-1

La Figure 7 donne la valeur tampon hygrique moyenne, calculée sur les trois derniers cycles, pour chaque échantillon et en moyenne pour chaque BTC- ρ_d . Les valeurs obtenues sont comprises entre 1,15 et 1,40 g/(m².%HR). Selon la classification du projet NORDTEST (Figure 2), les BTC- ρ_d étudiés sont classés comme de bon régulateurs hygriques ($1 < MBV < 2$). Ces résultats sont inférieurs aux valeurs trouvées dans la littérature pour des blocs de terre non stabilisée (Al Haffar et al., 2019; Bruno et al., 2018; McGregor et al., 2014a). Toutefois, il convient de noter que les formulations diffèrent et comme indiqué dans (McGregor et al., 2014b), la minéralogie de l'argile et la teneur en argile du matériau figurent parmi les principaux paramètres influençant sur la valeur tampon hygrique. Par ailleurs, les vitesses d'air ne sont pas précisées dans ces références or celles-ci peuvent

avoir une influence majeure sur les résultats conduisant à une valeur tampon hygrique surestimée lorsque la vitesse d'air est trop forte (Khaled et al., 2023).

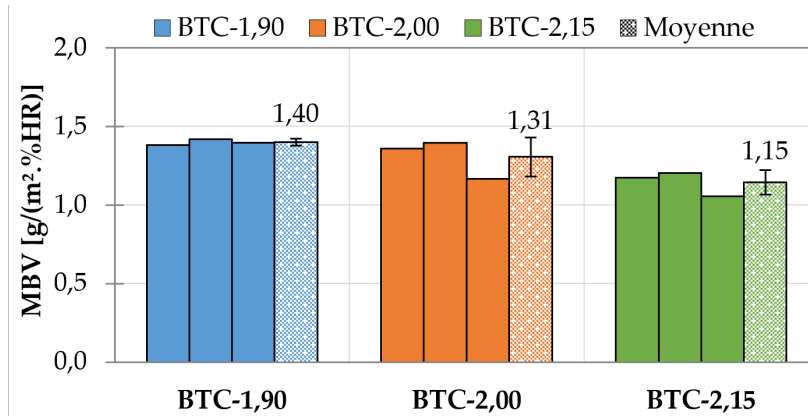


Figure 7. Valeur tampon hygrique moyenne des BTC et matériaux étudiés

Une diminution de la valeur tampon hygrique est observée lorsque la masse volumique apparente augmente (Figure 8). La valeur tampon hygrique est un couplage des propriétés de stockage et de transfert. Ici, la diminution de la porosité induit probablement une diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau qui l'emporte sur l'augmentation de la surface spécifique conduisant ainsi à une diminution de la valeur tampon hygrique. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de (Yi et al., 2016) où il est mis en évidence que, pour des humidités relatives élevées, la diminution des macropores due à la réduction de la porosité entraîne une capacité de diffusion de la vapeur d'eau très limitée dans le matériau.

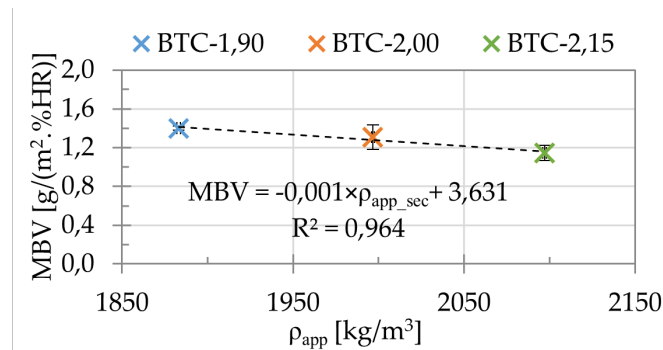


Figure 8. MBV en fonction de la masse volumique apparente au point sec

IV. Conclusion

Cette étude porte sur des BTC de même formulation et avec des masses volumiques différentes par compactage différencié. Elle montre que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'augmentation de la masse volumique et donc la diminution de la porosité totale du matériau. La caractérisation hygrique conduit à classer les BTC testés comme bons régulateurs d'humidité. L'augmentation de la masse volumique conduit à une diminution des valeurs tampons hygriques sur la plage de masses volumiques considérée.

Pour approfondir l'effet de la masse volumique sur les caractéristiques hygrothermiques, une plage plus large de masses volumiques pourrait être examinée. Par ailleurs, pour la partie caractérisation thermique, l'influence de la teneur en eau pourrait compléter cette étude en considérant différents niveaux d'humidité relative rencontrés dans les bâtiments (de 35 à 80 %HR). Il serait également intéressant d'explorer l'influence de la fraction argileuse sur les caractéristiques hygrothermiques des BTC.

REFERENCES

- Al Haffar, N., Fabbri, A., McGregor, F., Colina, H., 2019. Cement stabilization effect on mechanical and hygric properties of compacted earth. Presented at the Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, pp. 283–295. <https://doi.org/10.18552/2019/IDSCMT5159>
- Brambilla, A., Jusselme, T., 2017. Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype. *Energy and Buildings* 156, 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.070>
- Bruno, A.W., Perlot, C., Mendes, J., Gallipoli, D., 2018. A microstructural insight into the hygro-mechanical behaviour of a stabilised hypercompacted earth. *Mater Struct* 51, 32. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1160-9>
- Collet, F., Serres, L., Miriel, J., Bart, M., 2006. Study of thermal behaviour of clay wall facing south. *Building and Environment* 41, 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.024>
- EN ISO 11508, 2017. Soil quality - Determination of particle density.
- Fabbri, A., Morel, J.C., 2016. Earthen materials and constructions, in: *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Elsevier, pp. 273–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00010-X>
- Fabbri, A., Xu, L., Wong, H., McGregor, F., 2019. Hygrothermal and Hydromechanical Behaviours of Unstabilized Compacted Earth, in: Reddy, B.V.V., Mani, M., Walker, P. (Eds.), *Earthen Dwellings and Structures*, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer Singapore, Singapore, pp. 457–466. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_39
- Gaillard, C., 2022. Building with Earth and the Meaning of Thermal Inertia.
- Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment* 44, 1935–1942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007>
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., Acquaye, A., 2013. Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends. *Energy and Buildings* 66, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>
- Keefe, L., 2005. *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation*, 1st Edition. ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203342336>
- Khaled, S., Collet, F., Prétot, S., Bart, M., 2023. Effect of Air Velocity and Initial Conditioning on the Moisture Buffer Value of Four Different Building Materials. *Materials* 16, 3284. <https://doi.org/10.3390/ma16083284>
- Mansour, M.B., Jelidi, A., Cherif, A.S., Jabrallah, S.B., 2016. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials* 104, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>

McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., Shea, A., 2014a. Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment* 75, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>

McGregor, F., Heath, A., Shea, A., Lawrence, M., 2014b. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment* 82, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>

Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P., 2001. Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36, 1119–1126. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8)

Mu, J., Yu, S., Hao, S., 2023. Quantitative evaluation of thermal conductivity of earth materials with different particle size distributions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184, 113574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113574>

Murad, M.A., Bennethum, L.S., Cushman, J.H., 1995. A multi-scale theory of swelling porous media: I. Application to one-dimensional consolidation. *Transp Porous Med* 19, 93–122. <https://doi.org/10.1007/BF00626661>

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2012. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials* 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

Praseeda, K.I., Reddy, B.V.V., Mani, M., 2016. Embodied and operational energy of urban residential buildings in India. *Energy and Buildings* 110, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.072>

Rode, C., Peuhkuri, R.H., Mortensen, L.H., Hansen, K.K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., Harderup, L.-E., 2005. Moisture Buffering of Building Materials.

Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J.-C., Grillet, A.-C., 2017. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Solar Energy* 141, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002>

Taylor, P., Luther, M.B., 2004. Evaluating rammed earth walls: a case study. *Solar Energy* 76, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.026>

Walker, P.J., 1995. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites* 17, 301–310. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9)

Yi, S.-Y., Fan, L.-W., Fu, J.-H., Xu, X., Yu, Z.-T., 2016. Experimental determination of the water vapor diffusion coefficient of autoclaved aerated concrete (AAC) via a transient method: Effects of the porosity and temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103, 607–610. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.111>

Zhang, L., Sang, G., Han, W., 2020. Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate. *Sustainable Cities and Society* 55, 102070. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102070>