

COMPORTEMENT HYGROMÉTRIQUE DU BÉTON DE TERRE CRUE ET DU BLOC DE TERRE COMPACTÉE (BTC)

Réception : 31/10/2022

Acceptation : 28/11/2022

Publication : 05/01/2023

HAMROUNI^{1,2} I., OUAHBI² I., CRUMEYROLLE² O., TAIBI² S., JAMEI¹ M., ZENZRI¹ H.

¹ Université de Tunis Elmanar, Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis, Laboratoire de Génie Civil (LGC), Tunis, Tunisie, e-mails : ichrak.hamrouni@enit.utm.tn, mehjamei@yahoo.fr, hatem.zenzri@enit.utm.tn.

² Université Le Havre Normandie, Laboratoire LOMC, CNRS UMR 6294, Le Havre, France, emails : ichrak.hamrouni@doc.univ-lehavre.fr, ouahbit@univ-lehavre.fr, natalija.lhuissier@univ-lehavre.fr, said.taibi@univ-lehavre.fr.

Résumé :

Pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques, construire avec des matériaux écologiques et économiques constitue l'une des alternatives. Parmi les matériaux de construction à faible impact environnemental, on trouve la terre crue qui est le matériau de construction naturel le plus répandu à travers le monde. Les techniques de construction en terre crue les plus connues sont les blocs de terre compactée, la terre compactée et le béton de terre. Plusieurs études ont été menées sur le comportement mécanique et hygrothermique de ce matériau biosourcé et leurs résultats sont encourageants. Dans cette étude, on s'intéresse uniquement au comportement hygrométrique de la terre compactée (BTC) et le béton de terre crue (Cémenter). Une analyse comparative par rapport aux matériaux de construction « classiques » comme le béton de ciment et les briques en terre cuite est présentée.

Mots - clés : Béton de Terre Crue, Bloc de Terre Compactée BTC, hygrométrie, essais expérimentaux.

Abstract: To meet environmental and energy challenges, building with ecological and economical materials is one of the alternatives. One such low-impact building material is raw earth, which is one of the most widely used natural building materials around the world. The most known raw earth construction technics are compacted earth blocks, rammed earth and raw earth concrete. Several studies have been carried out on the mechanical and hygrothermal behavior of this bio-based material and their results are encouraging. In this study, we are interested in the hygrometric behavior of compacted earth blocks and earth concrete. A comparative analysis with the "classic" construction materials such as cement concrete and fired clay-bricks is presented.

Keywords : Raw earth concrete, compacte dearth block BTC, hygrometric, experimental tests.

1-Introduction

Le domaine de construction est responsable de 10% des émissions de gaz à effet de serre. Afin de réduire cet effet, l'une des solutions est d'utiliser des matériaux de construction écologiques, économiques et disponibles partout et en grandes quantités. La terre crue répond à ces critères et représente l'une des alternatives étudiées par des ingénieurs et des chercheurs ces dernières années. Enormément de maisons sont construites en terre dans le monde, environ 50 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre [1]. La terre crue constitue une alternative comme matériau de construction non énergivore en termes d'énergie grise, présentant des performances remarquables en termes de confort hygrothermique. Le choix d'un éco-matériau à base de terre crue comme matériau de construction doit remplir un cahier des charges précis concernant la résistance mécanique, le comportement hygro-mécanique, la durabilité, la rigidité/ductilité, mais aussi des performances dans les transferts thermique et hygrométrique, autrement dit, son pouvoir régulateur température-humidité ou transfert couplé hygro-thermique. Dans cette étude, on s'intéresse au comportement hygrométrique des éco-matériaux à base de terre crue : la terre compactée (BTC) et le béton de terre crue (Cématerre). En premier lieu, un état de l'art synthétise les travaux existants dans la littérature. Cette partie porte sur les lois de transferts hygrométriques, les techniques de mesures de ces modes de transferts et quelques résultats de la littérature sur le comportement hygrométrique de la terre crue. En deuxième lieu, des essais expérimentaux de mesure des transferts hygrométriques à travers la BTC et le Cématerre ont été réalisés. Une analyse comparative par rapport aux matériaux de construction « classiques » comme le béton de ciment et les briques en terre cuite est présentée.

2- Etat de l'art

2.1- Lois de transferts hygrométriques

La diffusion de la vapeur d'eau est donnée par la loi de Fick qui exprime la densité de flux diffusif de vapeur j_v [kg/ (m². s)] en fonction du gradient de vapeur :

$$j_v = \delta_v \cdot \frac{\Delta p_v}{e} \quad (1)$$

- p_v : pression de vapeur [Pa]
- δ_v : perméabilité à la vapeur du matériau [kg/ (m. s. Pa)]
- e : épaisseur de l'échantillon [m].

2.2- Techniques de mesures des transferts hygro-thermiques

Les techniques de mesure des propriétés hygrométriques des matériaux de construction les plus connues sont les suivantes :

- *Méthode de la coupelle*

Le principe de mesure consiste à placer un échantillon d'épaisseur e et de diamètre ϕ sous gradient de vapeur constant et unidimensionnel en condition isotherme. Connaissant le flux de vapeur à travers le matériau, déterminé par pesée, nous pouvons calculer la perméabilité à la vapeur d'eau δ_v en utilisant la loi de Fick :

$$\delta_v = e \frac{j_v}{\Delta p_v} \quad (2)$$

- *Appareil Gravitest 6400*

Le dispositif GraviTest est utilisé pour la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau selon la norme NF EN ISO 12572 en se basant sur le principe de la coupelle en conditions isothermes. L'avantage de cet appareil est l'automatisation de l'essai notamment pour le suivi de la masse. Il suffit de prédéfinir les conditions de mesure, telles que la

température et la vitesse de l'air et de programmer le cycle des paliers d'humidité relative voulus. En se basant sur la loi de Fick présenté précédemment, on détermine la perméabilité à la vapeur de six échantillons à la fois parce que ce dispositif a une capacité de six coupelles de mesure.

2.3- Quelques résultats de la littérature

Concernant la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux à base de terre crue, McGregor et al. (2014) [2] ont étudié plusieurs sols avec différents paramètres physiques tels que la densité du sol, la perméabilité à la vapeur d'eau, les isothermes de sorption et les méthodes de préparation pour déterminer leur influence sur le pouvoir tampon de l'humidité (la capacité du matériau à stocker l'humidité). Ils ont conclu que la minéralogie et la distribution de la taille des particules sont plus importantes pour le tampon d'humidité que la densité et les méthodes de préparation ou de stabilisation et que la perméabilité à la vapeur des briques de terre crue de différentes formulation est comprise entre $3,46.10^{-11}$ et $3,66.10^{-11}$ kg/ (m. s. Pa). En plus, Dondi et al. (2003) [3] ont étudié le transfert de la vapeur d'eau à travers les briques de terre crue en fonction de la porosité. Ils ont trouvé que la perméabilité varie entre 3.10^{-12} et 13.10^{-12} kg/ (m. s. Pa). Elle dépend de la microstructure, notamment du volume, de la taille et de la surface spécifique des pores qui ont été réalisés par porosimétrie à intrusion de mercure. El Fgaier et al. (2016) [4] ont étudié les caractéristiques hygrothermiques de trois types de briques en terre crue. Des murs expérimentaux ont été construits afin d'analyser leur comportement en conditions réelles. Les résultats ont montré que la teneur en eau massique est de 3,5% pour 95% d'humidité relative et une capacité thermique de 75 kJ/ (m². K), contribuant ainsi au confort dans la maison expérimentale. Hamrouni et al. (2022) [5] ont évalué la perméabilité à la vapeur d'un limon composé de 67% de sable (de 0,06 mm à 2 mm), environ 25% de limon (de 2 μm à 60 μm) et 8% de gravier (< 2 mm). Les résultats ont montré

que la perméabilité à la vapeur de ce matériau est égale à $9,38.10^{-12}$ kg/ (m. s. Pa).

3- Résultats des essais de transferts hygrométriques

3. 1- Béton de terre « Cématerre »

Le béton de terre « Cématerre » est composé de 88% de limon naturel prélevé du site de construction, 3% de chaux, 8% de ciment et renforcé par des fibres de lin.

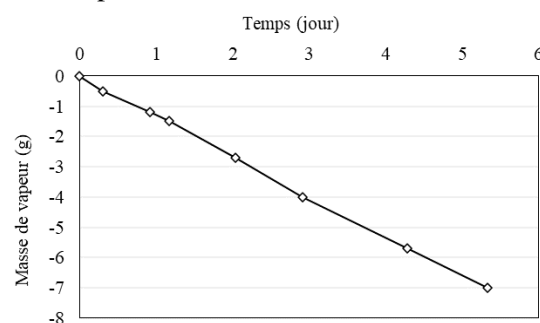


Figure 1 : Variation de la masse de vapeur d'eau en fonction du temps – Béton de terre

3. 2- Bloc de terre compactée

Le BTC est composé de 70% de sédiment naturel (10% sable, 56% limon et 34% argile) et de 30% de sable local et compacté à une énergie donnée (Optimum Proctor Modifié + 25 coups).

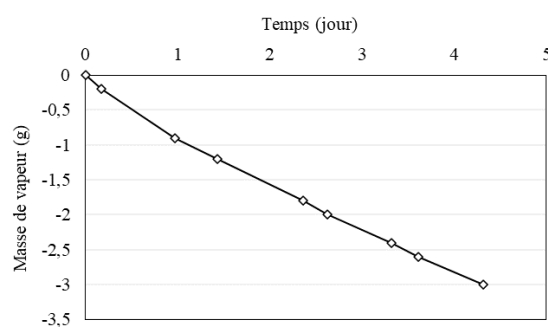


Figure 2 : Variation de la masse de vapeur d'eau en fonction du temps – terre compactée

Pour les deux matériaux, le régime permanent est atteint à peu près après 1 jour du début de l'essai. Les perméabilités à la vapeur de Cématerre et du BTC sont calculées en régime permanent où l'équilibre hygrométrique interne est atteint. Les valeurs des perméabilités à la vapeur d'eau déterminées expérimentalement

pour les deux matériaux sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Résultats de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau de Cématerre et BTC

Matériaux	Épaisseur de l'échantillon [m]	Gradient de pression de vapeur ΔP_v [Pa]
Cématere	0.015	2.48
BTC	0.03	2.48

Flux de vapeur d'eau [kg/ (m ² . s)]	Perméabilité à la vapeur d'eau liquide [kg/ (m. s. Pa)]
1.77×10^{-6}	1.06×10^{-11}
9.24×10^{-7}	1.12×10^{-11}

4- Interprétation

- En comparant les résultats obtenus lors de mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau, on peut conclure que l'ordre de grandeur de 10^{-11} kg/ (m. s. Pa) est celui qui caractérise la terre crue ;
- Si on compare nos résultats avec ceux de la littérature [2] et [3], on constate que l'ordre de grandeur est acceptable ;
- En comparant maintenant les résultats obtenus pour la terre crue avec ceux des matériaux de construction classiques, on trouve que la terre crue est de 10 à 100 fois plus perméable à la vapeur d'eau (Tableau 2).

Tableau : 2 - Perméabilité à la vapeur des matériaux de construction classiques [6]

Matériau	Perméabilité à la vapeur d'eau [kg/ (m. s. Pa)]
Béton plein	6.33×10^{-13}
Terre cuite	3.16×10^{-13} à 1.9×10^{-12}
Plâtre	2.74×10^{-12}

4- Conclusion

La terre crue est devenue depuis longtemps le matériau de construction naturel le plus répandu à travers le monde grâce à ses performances mécaniques et hygrothermiques. Dans cette étude, nous avons montré que l'ordre de

grandeur de 10^{-11} kg/ (m. s. Pa) est celui qui caractérise la terre crue et nous avons mis en évidence la capacité importante de ce matériau à diffuser la vapeur. La perméabilité à la vapeur d'eau de ces matériaux écologiques est de 10 à 100 fois plus importante que les matériaux de construction classique tels que le béton de ciment, la terre cuite et le plâtre ...

Références bibliographiques

- [1] Ben Ayed H., Etude expérimentale et numérique du comportement mécanique en compression des Blocs Autobloquants de Terre Stabilisée (BATS)., Thèse soutenue 2016,
- [2] McGregor, F., Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 2014, 82, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>,
- [3] Dondi, M., Principi, P., Raimondo, M., & Zanarini, G. Water vapour permeability of clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(4), 253–258. [https://doi.org/10.1016/S09500618\(02\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S09500618(02)00117-4),
- [4] El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Chapiseau, C., & Antczak, E. (2016). Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 6, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.011>.
- [5] Hamrouni, I., Ouahbi, T., El Hajjar Ahmad., Taibi, S., Jamei, Mehrez., Zenzri, H. Water vapor permeability of flax fibers reinforced earth: Experimental and micro-macro modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2123857>
- [6] Hibouche A., Sols traités aux liants Performances hydro-mécaniques et hygrothermiques Applications en BTP., Thèse soutenue, Université Le Havre Normandie, 2013.