

# Projet B2M : Propriétés hygrothermiques des briques de terre crue

Maillard P<sup>1</sup>, Oubrahim I<sup>2</sup>, Al Haffar N<sup>2</sup>, Pinel A<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC)

<sup>2</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

**RESUME** Cette étude issue du projet B2M (Briques-Mortiers-Maçonneries) est axée sur les propriétés hygrothermiques de quatre références de brique de terre crue produites par trois procédés différents (moulage, compression et extrusion). Les résultats de sorption hygroscopique et du MBV (Moisture Buffer Value) soulignent la grande capacité de régulation de l'humidité de la terre crue. De même, les faibles valeurs du facteur de résistance à la vapeur d'eau ( $\mu$ ) indiquent une grande perméabilité et donc une facilité de circulation de la vapeur d'eau dans des murs en terre crue. La mesure de la conductivité thermique par deux méthodes distinctes (fil chaud et fluxmètre) montre des résultats différents selon la méthode utilisée démontrant que la terre crue est un matériau hétérogène.

**Mots-clefs** terre crue, brique, perméabilité, sorption hygroscopique, conductivité thermique

## I. INTRODUCTION

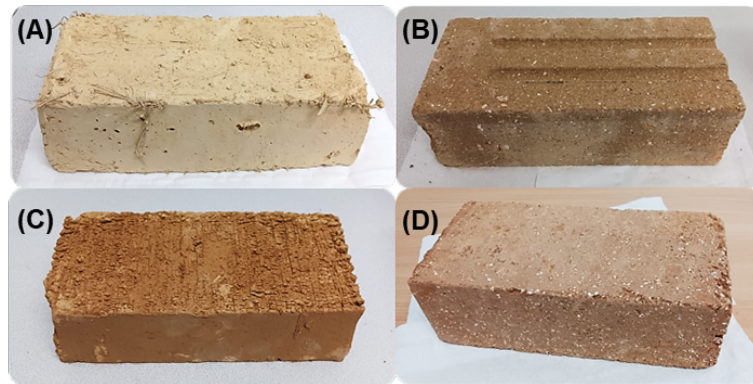
Dans le domaine de la construction, les matériaux bio- et géo-sourcés, et en particulier la terre crue, suscitent un regain d'intérêt pour leurs propriétés hygrothermiques, notamment leur capacité à réguler l'humidité. Dans le cadre du projet B2M (Brique-Mortier-Maçonnerie), quatre références de briques en terre crue sont caractérisées au niveau matériau par une série d'essais : sorption hygroscopique, perméabilité à la vapeur d'eau, valeur de tampon hydrique (MBV), conductivité thermique et absorption capillaire. Ces essais seront réalisés en doublon entre le CTMNC (*Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction*) et le CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) afin de valider la reproductibilité des résultats, principalement pour la sorption, la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'absorption capillaire.

Le projet vise ensuite à valider le comportement de la brique en conditions réelles à l'échelle 1, en tenant compte des conditions aux limites comme la protection par débord de toiture, et de tester si les simulations numériques avec le logiciel de simulation des transferts de chaleur et d'humidité WUFI (*Wärme Und Feuchte Instationär*), incluant la prise en compte de la pluie battante et des diverses hypothèses, permettent de reproduire fidèlement cette réalité. Pour cela, les propriétés hygrothermiques de la brique caractérisées dans la première phase serviront de données d'entrée dans le modèle WUFI. Une expérimentation in situ a ainsi été mise en place sur le site du CSTB à Grenoble : un mur en briques de terre crue, protégé par un débord de toiture et instrumenté, permet de suivre sur une année complète l'évolution de paramètres comme l'humidité, la température, la teneur en eau et l'érosion de la surface du mur. Ce suivi permettra

de comparer les résultats expérimentaux et les prévisions du modèle WUFI, afin d'optimiser les paramètres pour des simulations plus précises et adaptées aux conditions réelles.

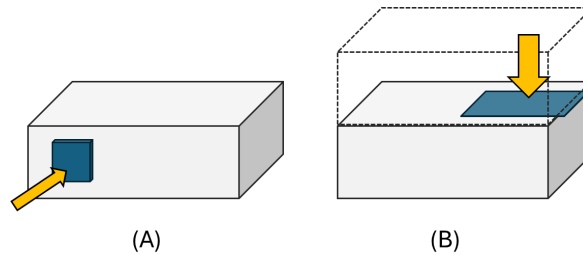
## II. METHODOLOGIE

Les 4 briques sont référencées suivant leur mode de fabrication : BTM, brique moulée ; BTE, brique extrudée ; BTCa, brique compressée artisanale et BTCi, brique compressée industrielle (Figure 1).



**FIGURE 1.** Photo des briques testées, BTM (A), BTCi (B), BTE (C), BTCa (D)

La sorption/désorption hygroscopique a été réalisée suivant la norme NF EN ISO 12571, avec 6 paliers d'humidité (30, 50, 70, 80, 90 et 95% HR) à 23°C sur des cubes de 4 cm de côté découpés dans la brique [AFNOR, 2021]. Afin d'évaluer l'effet de la température de séchage (65°C et 105°C), deux lots d'éprouvettes ont été préparés et ainsi testés. Le 2<sup>ème</sup> essai réalisé est le MBV « *moisture buffer value* » (réalisation de cycles courts entre 2 humidités) afin d'évaluer les capacités de tampon hydrique de chacune des références. Lors cet essai de MBV, les éprouvettes (cubes de 4 cm) sont ainsi placées dans une enceinte climatique à 23°C pendant 8h à 85% HR puis à 50% HR pendant 16h avec un suivi de leur masse. L'essai est arrêté lorsque l'écart de masse entre l'humidité haute et l'humidité basse devient constant [Rode, 2005]. L'essai de perméabilité à la vapeur d'eau a été effectué selon la norme NF EN ISO 12572 [AFNOR, 2016], en coupelles sèches et en coupelles humides. De plus, deux lots d'éprouvettes avec des épaisseurs différentes (15 et 20 mm) ont été testés. La conductivité thermique a été mesurée par deux méthodes distinctes : le fluxmètre et le fil chaud. La mesure fluxmétrique a été faite sur la tranche (i.e côté long) de la brique, c'est-à-dire la face visible du mur une fois la brique maçonnée afin d'obtenir une valeur en adéquation avec ce que demandera le logiciel WUFI. La mesure par fil chaud a été faite sur la face de pose de la brique en raison des dimensions de la sonde qui nécessitent d'avoir une surface d'éprouvette plus élevée afin que la sonde ne dépasse pas de celle-ci (Figure 2).



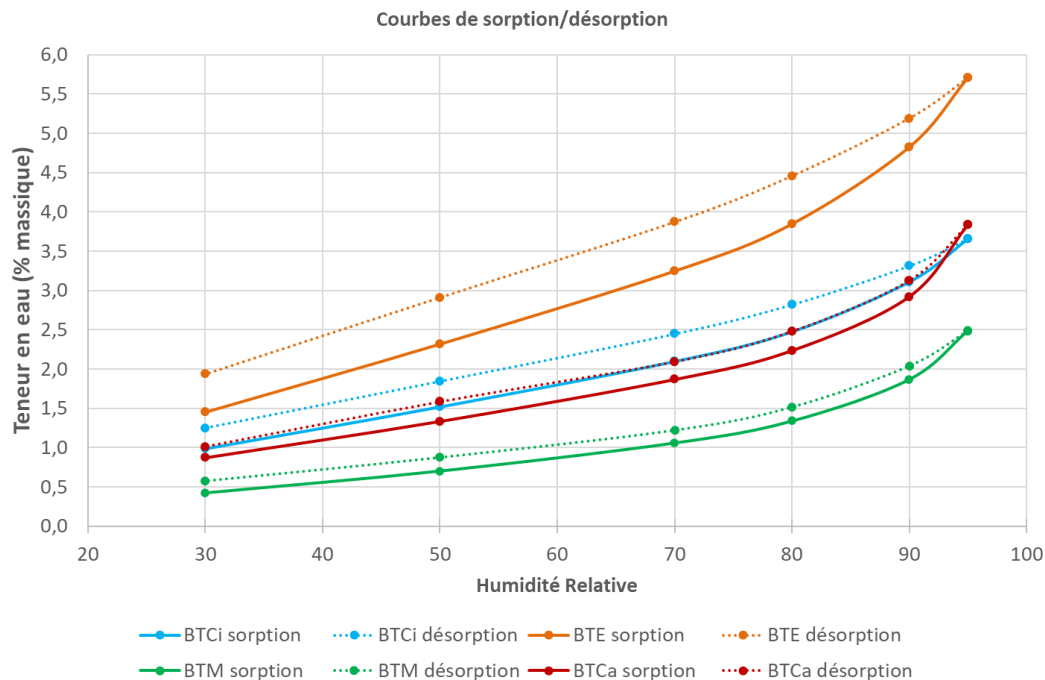
**FIGURE 2.** Direction de mesure de la conductivité thermique par fluxmètre (A), et par fil chaud (B)

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

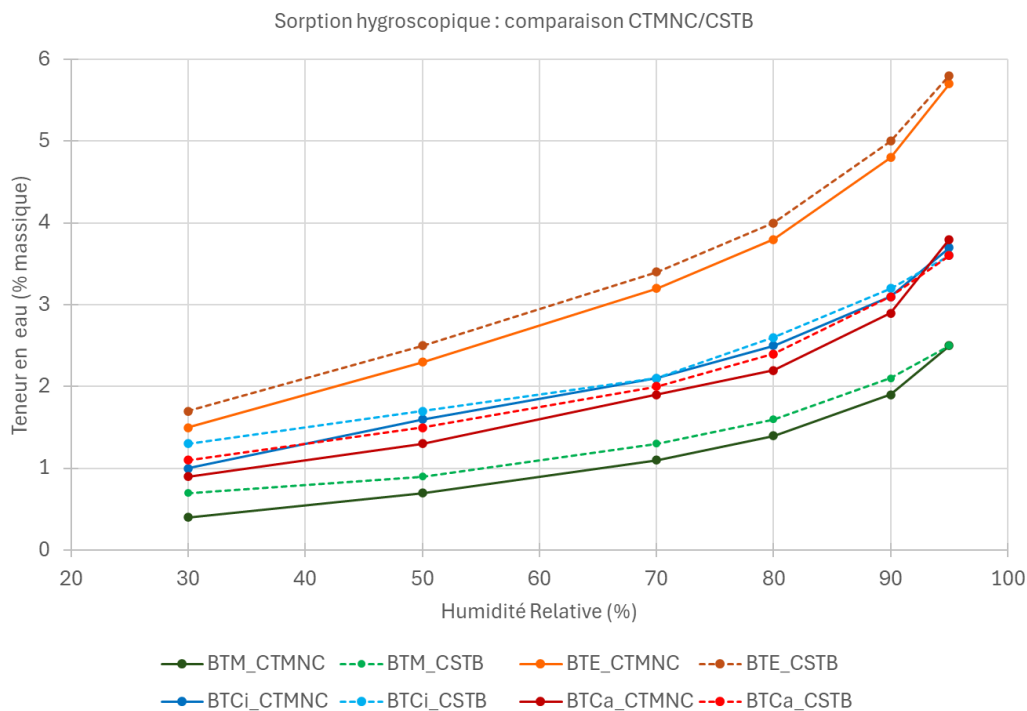
#### A. Sorption hygroscopique et Moisture Buffer Value (MBV)

Les courbes de sorption soulignent des propriétés différentes selon le mode de fabrication des briques et leur composition (Figure 3). La brique extrudée (BTE) présente des capacités de sorption nettement plus élevées que les 3 autres références, jusqu'à 5,7% d'eau à 95% HR. Les briques extrudées ont généralement des granulométries assez fines avec des % d'argile importants [Maillard, 2016]. Les hystérésis (i.e. écart entre courbes sorption/désorption), soulignent également des capacités plus importantes pour la BTE. Le lot séché à 65°C, non présenté dans cette publication, indique des valeurs plus faibles d'où la nécessité de maîtriser les conditions initiales de température et d'humidité relative des éprouvettes qui influencent leur teneur en eau. En effet les cycles de sorption/désorption sont directement impactés par l'histoire hygrothermique du matériau (conditions de séchage, stockage, mise en œuvre...).

La similitude des résultats entre les deux laboratoires du CTMNC et du CSTB confirment que la bonne reproductibilité de l'essai et que le norme est bien adaptée au matériau terre crue (Figure 4).



**FIGURE 3.** Courbes de sorption (trait plein) et de désorption (trait pointillé) des briques (lot séché à 105°C, essais réalisés au CTMNC).



**FIGURE 4.** Courbes de sorption des briques (lot séché à 105°C), essais réalisés au CTMNC (trait plein) et essais réalisés au CSTB (trait pointillé).

Le second essai, le MBV vient appuyer ces résultats avec un classement des briques en « excellente » pour 3 des références et en « bonne » pour la dernière (Figure 5) [Rode, 2005]. L'ordre reprend celui observé lors de l'essai de sorption.

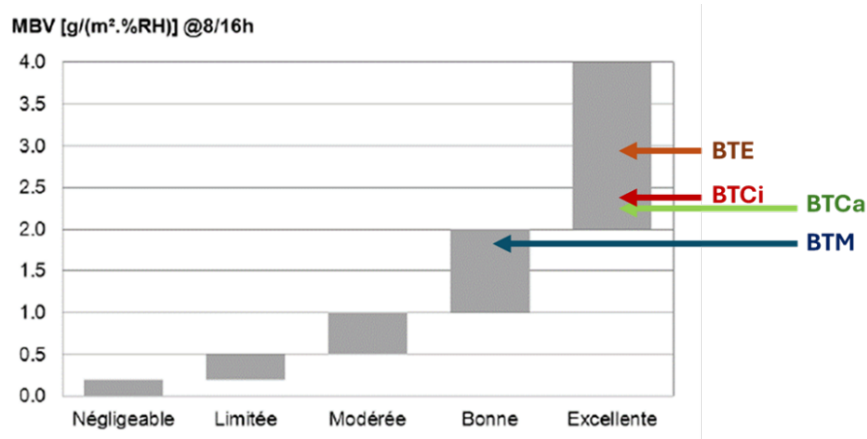


FIGURE 5. Classement MBV des briques de terre crue

### B. Perméabilité à la vapeur d'eau

Les facteurs de résistance à la vapeur d'eau, rassemblés dans le Tableau 1, sont faibles et en adéquation avec les valeurs classiquement trouvées dans la littérature [Maillard, 2014]. Avec une épaisseur d'éprouvette de 15 mm, les valeurs sont comprises entre 4,4 et 6,0 en coupelle humide et entre 11,0 et 14,2 en coupelle sèche. Avec une épaisseur plus élevée (20 mm), le facteur de résistance ( $\mu$ ) diminue bien que cette caractéristique soit intrinsèque au matériau. Cette observation a déjà été évoquée dans la littérature et souligne certaines limites dans le protocole expérimental, bien que des corrections soient appliquées lors du calcul [McGregor, 2017]. Ces valeurs associées aux capacités de sorption hygroscopique mettent en avant un matériau ayant un fort potentiel de régulation de l'humidité dans un bâtiment. De même, la reproductibilité de l'essai a été confirmé avec des valeurs similaires obtenues dans les deux laboratoires partenaires.

TABLEAU 1. Facteurs de résistance à la vapeur d'eau des briques

Références	Epaisseur 15 mm		Epaisseur 20 mm	
	$\mu$ coupelle humide [-]	$\mu$ coupelle sèche [-]	$\mu$ coupelle humide [-]	$\mu$ coupelle sèche [-]
BTE	4,4	11,0	4,0	10,5
BTCa	4,6	12,0	4,0	11,7
BTCi	4,9	11,8	4,3	11,7
BTM	6,0	14,2	5,4	13,8

### C. Conductivité thermique

En méthode fluxmétrique, deux conditionnements des éprouvettes ont été réalisés : l'un avec un séchage à 105°C afin d'avoir une teneur en eau la plus proche de 0 et le second avec une stabilisation des éprouvettes à 23°C et 50% HR. A l'état sec, les valeurs sont ainsi comprises entre

0,49 et 0,66 W/(m.K) (Tableau 2). Les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les briques BTM et BTE ayant une masse volumique inférieure en comparaison des deux autres références. En condition ambiante (23°C-50% HR), l'augmentation des valeurs de conductivité est directement liée à une teneur en eau plus élevée des éprouvettes (entre 0,8 et 2,6 % en masse).

La méthode du fil chaud a permis de tester les éprouvettes à l'état ambiant (19°C-50% HR) dans des conditions proches de celles appliquées avec le fluxmètre, puisque les teneurs en eau sont similaires. Les valeurs sont ici comprises entre 0,93 et 1,23 W/(m.K), nettement plus élevées que celles obtenues avec la méthode fluxmétrique. Cela souligne que des méthodes de mesure différentes donnent des valeurs différentes dans le cas de matériau hétérogène comme la terre crue. Ce phénomène ne se retrouve pas dans le cas de matériau homogène, ce qui a été vérifié pour cette étude avec le pyrex utilisé comme matériau étalon. Dans la littérature, il convient de connaître les méthodes de mesure utilisées afin de comparer les matériaux entre eux.

Pour rappel, avec un fluxmètre, un échantillon est placé entre une plaque « chaude » et une plaque « froide », le flux de chaleur traversant ainsi l'échantillon. Avec le fil chaud, une sonde est placée en sandwich entre deux briques. Dans le cadre de cette étude, dans le premier cas, les mesures ont été réalisées sur 3 échantillons par référence, prélevés dans 3 briques. Dans le second cas (i.e. fil chaud), les mesures ont été faites sur 3 paires de briques.

Cette observation reste à nuancer car les mesures au fil chaud et au fluxmètre ont été faites dans deux directions (Figure 2) ; notamment pour la brique extrudée (BTE) qui peut présenter de l'anisotropie du fait de son procédé de fabrication [Maillard, 2014]. Toutefois, cette BTE a été extrudée sans vide d'air d'où sa faible masse volumique (1,6 g.cm<sup>-3</sup>) et donc une pression d'extrusion faible en comparaison d'une extrusion classique avec vide d'air où la masse volumique atteint couramment 2 g.cm<sup>-3</sup> [Maillard, 2014]. Pour les autres références (BTM, BTCi et BTCa), un rapprochement peut être fait avec le pisé dont l'isotropie a été démontré [Bui, 2009]. Des mesures complémentaires au fluxmètre dans la direction de la face de pose de la brique permettront de confirmer ces observations.

**TABLEAU 2. Conductivité thermique des briques (méthode et conditionnement)**

Méthode		Fluxmètre (avec séchage 105°C)		Fluxmètre (23°C – 50%HR)		Fil chaud (19°C – 50%HR)	
Réf.	Mv (g.cm <sup>-3</sup> )	λ [W/(m.K)]	Humidité (%)	λ [W/(m.K)]	Humidité (%)	λ [W/(m.K)]	Humidité (%)
BTM	1,6	0,49 ± 0,06	≈ 0	0,57 ± 0,06	0,8	1,03 ± 0,02	0,8
BTCi	1,9	0,66 ± 0,03	≈ 0	0,73 ± 0,03	1,5	1,23 ± 0,05	1,5
BTCa	1,9	0,66 ± 0,02	≈ 0	0,77 ± 0,02	1,4	1,02 ± 0,05	1,4
BTE	1,6	0,61 ± 0,03	≈ 0	0,71 ± 0,04	2,6	0,93 ± 0,04	2,6

### III. CONCLUSION

Ces essais soulignent les fortes propriétés de la terre crue vis-à-vis de la régulation de l'humidité avec des différences notables entre les références de brique. La reproductibilité des résultats entre les deux laboratoires confirme la fiabilité du protocole. Quant à la conductivité thermique, le

choix de la méthode d'essai a une influence sur les valeurs mesurées. Pour la suite de ce projet B2M, les caractéristiques hygrothermiques des briques présentées permettront d'avoir des données d'entrée pour la modélisation WUFI et être comparées à celles qui seront obtenues dans la cellule instrumentée avec le mur en briques de terre crue.

## REFERENCES

- Rode, C., (2005). Moisture buffering of building materials, *Report BYG-DTU R-126*.
- Bui, Q.B., Morel, J.C., (2009). Assessing the anisotropy of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 23, 3005-3011.
- Maillard, P., & Aubert, J.E., (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56-61.
- Maillard, P., & Aubert, J.E., (2016). Hygrothermal properties of extruded earth bricks. *Proceeding - Terra Lyon*.
- AFNOR, (2016). Performances hygrothermiques des matériaux pour le bâtiment – Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. NF EN ISO 12572.
- McGregor, F., Fabbri, A., Ferreira, J., Simoes, T., Faria, P., & Morel, J.C., (2017). Procedure to determine the impact of the surface film resistance on the hygric properties of composite clay/fibre plasters. *Materials and Structure*, 50, 193.
- AFNOR, (2021). Performances hygrothermiques des matériaux pour le bâtiment – Détermination des propriétés de sorption hygroscopique. NF EN ISO 12571.

*NB : Ce projet a été financé par le Gouvernement dans le cadre du plan France2030 opéré par l'ADEME*