

Essais dynamiques pour caractériser le comportement thermique des murs - Application au béton de terre

Dynamic tests to characterize the thermal behavior of walls - Application to earth concrete

Manon RENDU^{1,3*}, Patrick SALAGNAC^{2,3}

¹ TIPEE (Plateforme Technologique), Rue Isabelle Autissier, 17140 Lagord, France

² LaSIE (UMR CNRS 7356) - La Rochelle Université, Av. A. Einstein, 17000 La Rochelle, France

³ RupeeLab, La Rochelle Université, CNRS, Tipee

*(auteur correspondant : manon.rendu@plateforme-tipee.com)

Résumé - Au stade de la conception, la connaissance des caractéristiques thermiques des matériaux est l'une des premières données nécessaires pour modéliser le comportement thermique d'un bâtiment. Cet article présente un protocole d'essai en Boîte Chaude Gardée pour estimer la résistance thermique d'un mur ossature bois ainsi que la conductivité thermique, la capacité thermique massique et la masse volumique de son matériau de remplissage lors d'un unique essai de 3 jours. La mesure est ainsi réalisée sur une éprouvette représentative d'un chantier et en conditions proches de conditions *in situ*.

Abstract - At the design stage, thermal characteristics are key to model the thermal behavior of a building. This article describes a Guarded Hot Box test protocol for estimating the thermal resistance of a timber-frame wall and the thermal conductivity, mass heat capacity and density of its infill material in a unique 3-day test. The advantages are that the test specimen is representative of a wall built on site, and that test conditions are close to in situ conditions.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	R	résistance thermique, $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$
c_p	capacité thermique massique, $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	S	surface, m^2
e	épaisseur, m	T	température, $^\circ\text{C}$
HR	humidité relative, -	<i>Symboles grecs</i>	
P	puissance, W	λ	conductivité thermique $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Q	densité de flux, $\text{W}.\text{m}^{-2}$	ρ	masse volumique, $\text{kg}.\text{m}^{-3}$

1. Introduction

Le secteur de la construction est confronté à des défis majeurs, accentués par les préoccupations croissantes liées au changement climatique. La nécessité de réduire l'empreinte carbone des matériaux de construction s'impose, privilégiant les options bas carbone, telles que les matériaux bio et géosourcés, et favorisant le ressourcement local [1]. Ces choix stratégiques s'accompagnent d'une évolution des pratiques de construction, visant à intégrer des matériaux durables et performants en termes d'isolation et de stockage thermique pour l'hiver et l'été.

Cependant, la caractérisation de ces nouveaux matériaux, en cours de développement, soulève plusieurs questions cruciales. Actuellement, les méthodes d'évaluation se concentrent souvent sur l'échelle du matériau, mais pour des matériaux très hétérogènes, il est impératif de

s'interroger sur la représentativité des volumes étudiés. De plus, les matériaux hygroscopiques, dont les propriétés peuvent varier considérablement, sont souvent soumis à des conditions de laboratoire qui ne reflètent pas fidèlement les environnements *in situ*. La variabilité des ressources, pour les matériaux bio et géosourcés, pose également un défi important. Cette variabilité peut influencer les performances thermiques, rendant leur caractérisation encore plus complexe. Enfin, les caractéristiques des matériaux à l'échelle d'une petite éprouvette en laboratoire et à l'échelle *in situ* intégrant les éventuels défauts de mise en œuvre peuvent être très différentes. Ces considérations soulignent la nécessité d'une approche holistique pour la caractérisation de ce type de matériau. Dans cet article, nous nous intéressons à un matériau géosourcé, le béton de terre. Ce dernier a déjà fait l'objet de nombreuses études de caractérisations thermiques et hydriques [2], [3], [4] à l'échelle du matériau en laboratoire.

Pour répondre aux interrogations soulevées par la caractérisation de ces matériaux de construction dans des conditions proches de l'*in situ*, cet article propose de réaliser des mesures sur un banc d'essai à échelle réelle et en conditions de température et d'humidité contrôlées. Cette approche présente plusieurs avantages. D'une part, elle permet d'étudier des volumes de matériaux qui reflètent ceux utilisés sur les chantiers, garantissant ainsi une meilleure représentativité des résultats. D'autre part, le conditionnement des ambiances de part et d'autre de la paroi et la mise en œuvre des matériaux sur ce banc d'essai s'apparente étroitement aux conditions réelles de construction et d'utilisation. En intégrant plusieurs points de mesure au sein de la paroi, il devient possible de croiser ces données avec les résultats obtenus en laboratoire, ce qui aide à qualifier la variation des propriétés du matériau, compte tenu des conditions de température et d'humidité. À cet égard, nous proposons un protocole d'essai basé sur la norme NF EN ISO 8990 [5], qui permet de mesurer la résistance thermique de la paroi, ainsi que d'analyser les propriétés du matériau de remplissage, telles que la conductivité, la capacité thermique volumique et la masse volumique, sur une paroi de grandes dimensions et en quelques jours d'essais. Une méthode directe et une méthode inverse sont appliquées. Cette méthodologie vise ainsi à fournir des données précises et pertinentes sur le comportement thermique des matériaux dans des conditions proches de la réalité, en température et humidité.

Dans un premier temps, le banc d'essai, la paroi et son instrumentation sont détaillés. La seconde partie décrit les méthodes de caractérisation mises en œuvre et la dernière partie présente les résultats obtenus par différentes méthodes et la comparaison entre ces résultats.

2. Installation expérimentale

2.1. Boîte Chaude Gardée

La Boîte Chaude Gardée (BCG) est un outil expérimental qui permet d'évaluer les performances thermiques et hydriques d'éléments d'enveloppes de bâtiments (Figure 1). Le principe consiste à insérer l'éprouvette (dimensions de $2,20 \times 2,20$ m) entre deux environnements contrôlés en température et humidité relative (Chambre froide et Chambre chaude) et à étudier son comportement thermohydrique. Deux modes sont utilisés : un fonctionnement en mode Boîte Chaude Gardée (pour estimer le coefficient de transmission thermique de l'éprouvette selon la norme NF EN ISO 8990 [5]) et un fonctionnement en mode chambres bi-climatiques (contrôle de la température, de l'humidité et/ou de la pression entre les chambres). En mode BCG, des deflecteurs servent à canaliser les flux d'air tangentiels à l'éprouvette. Une boîte de mesure (MB), placée dans la chambre chaude et en contact direct avec l'éprouvette, est régulée à la même température que la chambre chaude et permet de mesurer le flux de chaleur traversant l'éprouvette sur une surface de $1,725\text{ m} \times 1,725\text{ m}$.

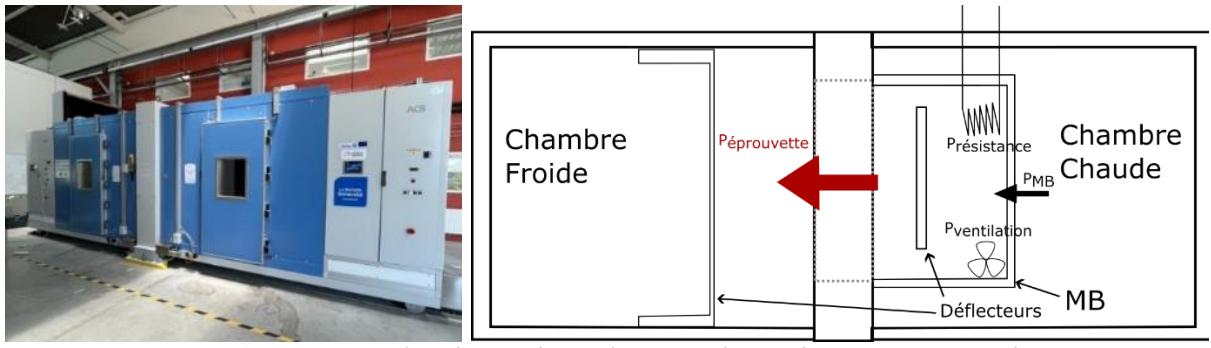


Figure 1 : La Boîte Chaude Gardée : photo et schéma de principe en mode BCG

2.2. Eprouvette mise à l'essai

L'éprouvette mise à l'essai dans la Boîte Chaude Gardée (Figure 2) est un mur ossature bois de 14 cm d'épaisseur rempli de béton de terre (terre, liant, copeaux de bois et eau) et recouvert de part et d'autre par des panneaux d'OSB de 1,3 cm d'épaisseur chacun.



Figure 2 : Eprouvette en cours de construction (couchée)

2.3. Instrumentation

La BCG ainsi que la paroi de béton de terre ont été instrumentées à l'aide de différents capteurs. De chaque côté de la paroi sont mesurées la vitesse d'air, l'humidité relative et les températures d'air proche paroi. Des capteurs de température ont été positionnés en surface de l'éprouvette et au sein de celle-ci, à différentes épaisseurs dans le béton de terre (Figure 3). À l'interface OSB / béton de terre ont été installés des fluxmètres.

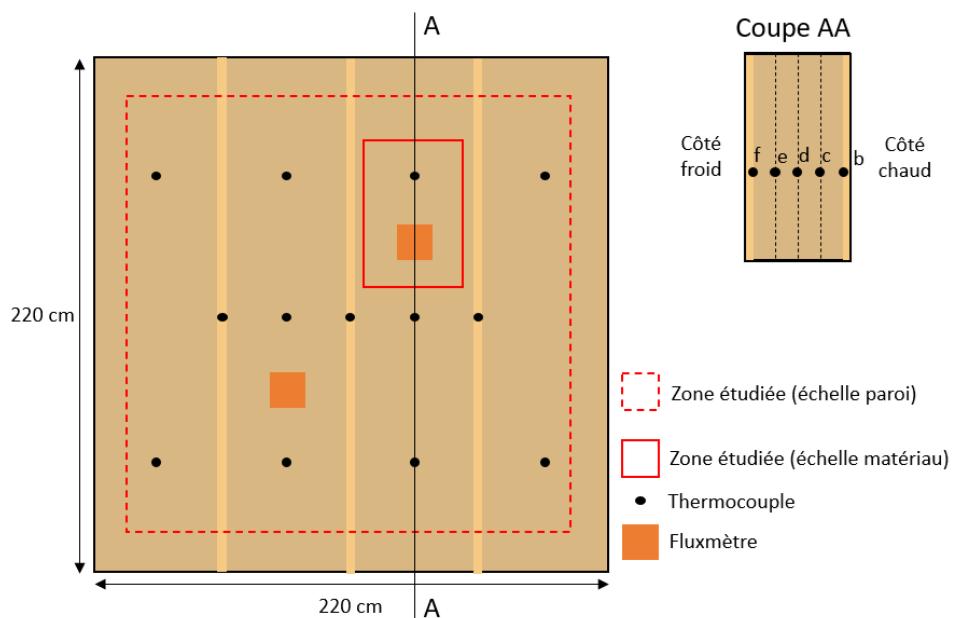


Figure 3 : Plan des capteurs vu de face, côté Chambre froide, sans l'OSB et coupe

Les températures d'air sont mesurées à l'aide de Pt100 ($\pm 0,15^\circ\text{C}$). Les températures de surface et dans les matériaux sont mesurées à l'aide de thermocouples de type T de 0,2 mm ($\pm 0,35^\circ\text{C}$). Les flux de chaleur sont mesurés par des fluxmètres (Captec) en cuivre ou aluminium de 15 cm \times 15 cm ($\pm 0,5 \text{ W.m}^{-2}$).

3. Méthodologie

3.1. Description générale

Le protocole proposé repose sur la norme NF EN ISO 8990 [5] qui consiste à soumettre l'éprouvette à un gradient de température opéré par une différence de température entre les chambres froide et chaude. Selon la norme, cet essai permet de mesurer la résistance thermique de l'éprouvette $R_{éprouvette}$ à partir des mesures obtenues en régime stationnaire en fin d'essai. La méthodologie utilisée dans cet article exploite le régime dynamique observé avant le régime stationnaire. Il est ainsi possible d'estimer la conductivité thermique $\lambda_{béton de terre}$ et la capacité thermique volumique $\rho c_{p,béton de terre}$ du matériau de remplissage par méthode inverse. La masse volumique $\rho_{béton de terre}$ est estimée par pesée avant et après l'essai. Ainsi, les propriétés thermiques du matériau de remplissage sont estimées en conditions proches de conditions réelles et sur une éprouvette représentative d'une réalisation sur chantier en termes de dimension et de mise en œuvre. Dans la partie 4, les résultats de cette étude sont comparés aux mesures par disque chaud (TPS1500) sur une éprouvette conditionnée à 23°C et 50%HR. Ils sont également comparés à des mesures réalisées précédemment par un laboratoire sur des éprouvette à sec : conductivité thermique sèche mesurée à 25°C par une plaque chaude gardée (λ -meter EP-500e) et la capacité thermique massique par un calorimètre Calvet BT2.15.

3.2. Scénario d'essais

L'éprouvette, après son conditionnement en chambre climatique à 23°C et 50%HR, est installée entre les chambres chaude et froide de la BCG dans ces mêmes conditions. Après 24h en régime stationnaire, la chambre chaude passe à 40°C et 19%HR, afin de rester à une pression partielle de vapeur d'eau constante, pour limiter le transfert de masse dans l'éprouvette pendant l'essai (en plus de la présence d'OSB, qui limite déjà ce risque). Après quelques heures de montée en température dans la chambre chaude, la boîte de mesure est mise en place et le conditionnement en humidité relative dans la chambre chaude est arrêté. Avant et après l'essai, l'éprouvette est pesée pour s'assurer qu'il n'y a pas eu de variation de masse.

3.3. Mesure de la résistance thermique de l'éprouvette suivant NF EN ISO 8990

Une fois le régime stationnaire atteint sur 12 heures, à partir des mesures de température moyennes des surfaces côté chaud $T_{s,CC}$ et côté froid $T_{s,CF}$, du flux de chaleur $P_{éprouvette}$ traversant la paroi en régime stationnaire et de la surface S sur laquelle le flux est mesuré, la résistance thermique de l'éprouvette $R_{éprouvette}$ est calculée selon l'équation (1).

$$R_{éprouvette} = \frac{S(\overline{T_{s,CC}} - \overline{T_{s,CF}})}{\overline{P_{éprouvette}}} = \frac{S(\overline{T_{s,CC}} - \overline{T_{s,CF}})}{\overline{P_{résistance}} + \overline{P_{ventilation}} + \overline{P_{MB}}} \quad (1)$$

3.4. Estimation des propriétés thermique du matériau de remplissage

3.4.1. Méthode directe

La conductivité thermique peut être estimée à partir de la mesure des températures dans le matériau (aux emplacements c et f , séparés par 10,5 cm de béton de terre) et du flux de chaleur mesurée par le fluxmètre Cu-01 ($Q_{CF,in}$), selon l'équation (2).

$$\lambda_{\text{béton de terre}} = \frac{\rho_{\text{béton de terre}} \cdot Q_{CF,in}}{\bar{T}_c - \bar{T}_f} \quad (2)$$

3.4.2. Méthode inverse

Afin d'estimer les propriétés thermiques du béton de terre par méthode inverse, un modèle nodal (Figure 4) a été mis en place. Le transfert de chaleur à travers la couche de béton de terre est modélisé par l'équation de la chaleur en une dimension. Les propriétés thermiques sont considérées constantes. Les conditions aux limites sont le flux de chaleur entrant dans la couche de béton de terre depuis la chambre froide d'une part, et la température dans le béton de terre à l'emplacement c (T_c) d'autre part pour s'affranchir de la très faible couche d'air présente lors de la mise en œuvre entre le béton de terre et l'OSB (côté chambre chaude). Sur la Figure 4, les conditions aux limites sont illustrées en rouge.

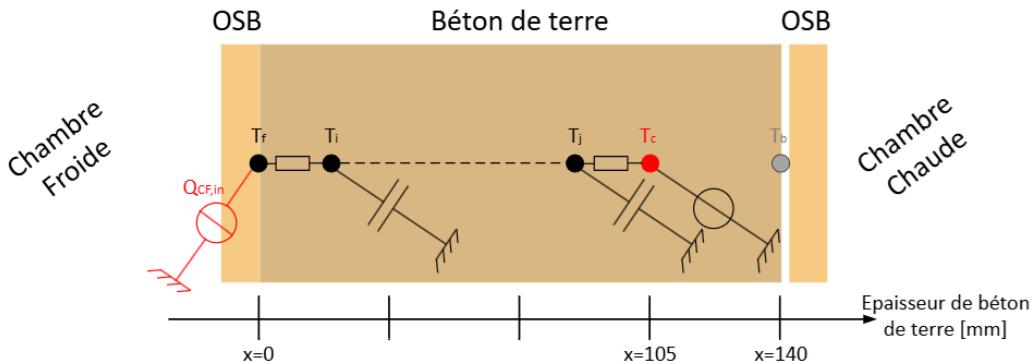


Figure 4 : Schéma du modèle thermique

Les capteurs de température sont situés en surface (emplacement f à l'interface de l'OSB et du béton de terre) et au cœur du matériau (emplacements d et e sur la Figure 3). Ils sont utilisés pour identifier les propriétés thermiques.

Les paramètres inconnus p_i de ce modèle sont λ et ρc_p du béton de terre. La variable de sortie est la température. L'identification se fait par la minimisation de la somme des écarts quadratiques entre les valeurs de températures expérimentales et celles simulées, en utilisant une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme de Nelder-Mead. La fonction « objectif » s'écrit :

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \sum_t \sum_{i=d,e,f} (T_{i,sim}(t) - T_{i,exp}(t))^2 \quad (3)$$

Le calcul est arrêté lorsque la fonction « objectif » atteint l'incertitude de mesure. Les valeurs initiales choisies sont : $(\lambda ; \rho c_p) = (0,5 ; 5 \cdot 10^5)$.

4. Résultats et discussions

Les températures et la densité de flux mesurées sur et dans l'éprouvette sont présentées sur la Figure 5 à gauche. Le régime stationnaire est bien établi en fin d'essai. Les moyennes de température mesurées dans le béton de terre pendant la dernière heure de l'essai sont présentées sur la Figure 5 à droite. La mesure du capteur à l'emplacement *b* présente une différence de $2,55^{\circ}\text{C}$ avec la valeur de la température attendue dans le béton de terre. Ceci est dû à la présence du capteur dans une lame d'air entre le béton de terre et le panneau d'OSB côté chaud. Les capteurs aux emplacements *c*, *d*, *e* et *f* semblent correctement placés dans le béton de terre.

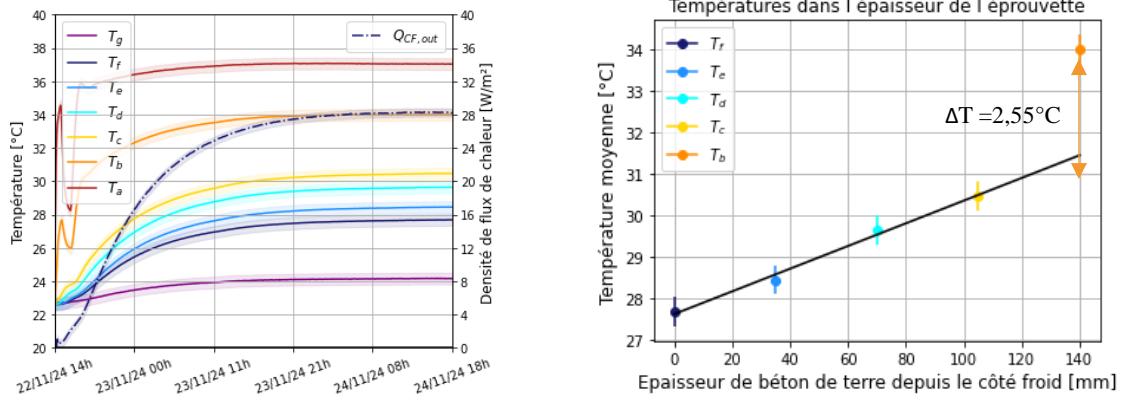


Figure 5 : Températures et densité de flux mesurés au cours de l'essai (à gauche) et moyenne des températures dans le béton de terre en régime stationnaire à gauche

La méthode inverse détaillée dans la partie 3.4.2 a été appliquée aux données mesurées en Boîte Chaude Gardée lors de l'essais réalisé selon l'ISO 8990. Afin de confirmer l'identifiabilité des paramètres à estimer (la conductivité thermique et la capacité thermique volumique du béton de terre), la sensibilité réduite de ces grandeurs, pour les 3 capteurs de température utilisés dans la fonction objective a été calculée et présentée sur la Figure 6.

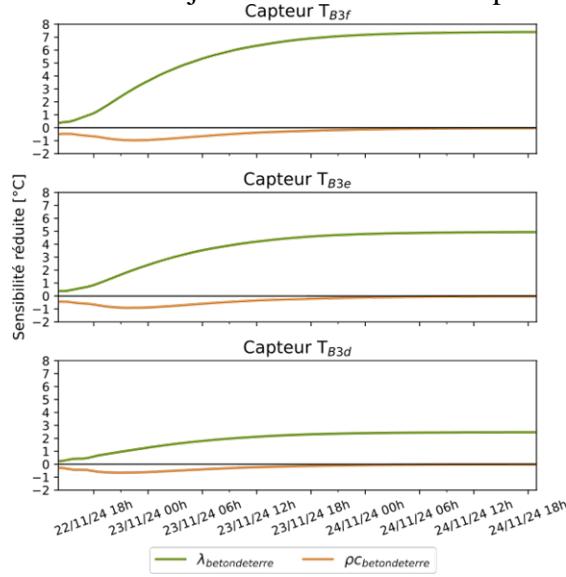


Figure 6 : Sensibilité réduite des paramètres à estimer tout au long de l'essai

Le coefficient de corrélation entre les paramètres $\lambda_{\text{béton de terre}}$ et $\rho c_{\text{béton de terre}}$ est de 0,4. Selon la Figure 6, les paramètres ont une sensibilité réduite supérieure à l'incertitude de mesure et le coefficient de corrélation est très largement inférieur à 1. Ces deux paramètres sont estimables. Les paramètres sont estimés à : $\lambda_{\text{béton de terre}} = 1,04 \pm 0,01 \text{ W/(m.K)}$ et $\rho c_{\text{béton de terre}} = 1805 \pm 118 \text{ kJ/(m}^3\text{.K)}$. A partir de ces estimations, la diffusivité thermique du

béton de terre est estimée à $a_{\text{béton de terre}} = 5,8 \cdot 10^{-7} \pm 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$. Les températures mesurées et simulées par le modèle décrit dans la Partie 3.4.2 avec ces paramètres estimés et les résidus sont présentés sur la Figure 7. Les résidus sont inférieurs à l'incertitude de mesure.

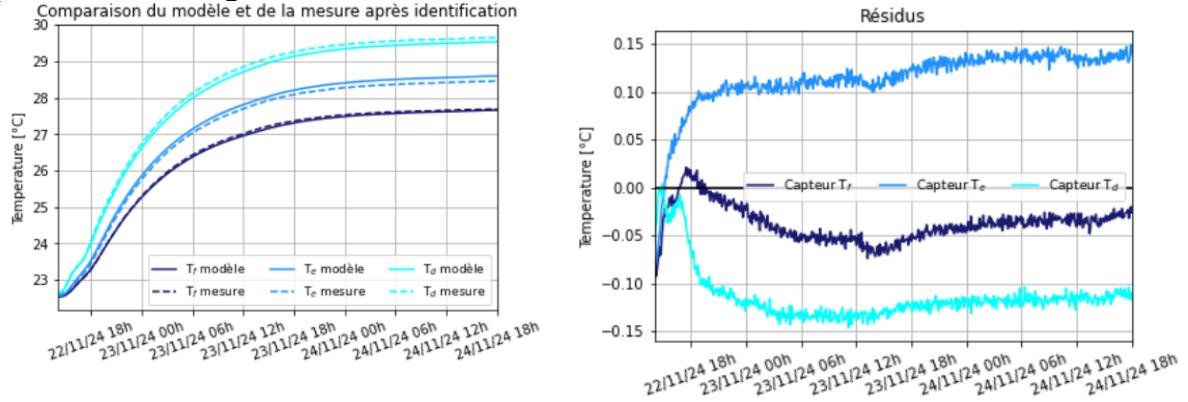


Figure 7 : Températures mesurées et simulées dans le béton de terre (gauche) et résidus (droite)

Synthèse

Le Tableau 1 synthétise les résultats mesurés à l'échelle matériau et à l'échelle paroi.

Grandeur physique	Echelle Conditionnement Méthode	1 Matériau Etuve à 45°C Mesure à 25°C λ -mètre Calorimètre Calvet	2 Matériau Enceinte à 23°C et 50% Disque chaud	3 Paroi Enceinte à 23°C et 50% Essai 23°C – 40°C Méthode directe	4 Méthode inverse
Conductivité thermique [W/m/K]		0,34 ± 0,02	0,70 ± 0,01	1,06 ± 0,2 1,06 ± 0,14	1,04 ± 0,01
Capacité thermique volumique [kJ/m³/K]		1272	1417		1805 ± 118
Masse volumique apparente [kg/m³]		1566 ± 13	1677		1890 ± 80
Capacité thermique massique [J/kg/K]		812	845		960 ± 70
Diffusivité thermique [10⁻⁶ m²/s]		0,266	0,497 ± 0,02		0,58 ± 0,04

Tableau 1 : Synthèse des résultats mesurés et calculés (les mesures en gras)

A partir de ces données mesurées par un laboratoire sur matériau sec (colonne 1), la résistance thermique de l'éprouvette est estimée à $0,65 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ (selon la norme NF EN ISO 6946 [6], en tenant compte d'une conductivité thermique du bois et des panneaux d'OSB à $0,13 \text{ W/m/K}$ [7]). Les résultats de la colonne 2 proviennent de mesures réalisées avec un disque chaud. Les résultats de la colonne 3 sont obtenus après avoir utilisé l'équation (2) pour calculer la conductivité thermique du béton de terre lors de deux essais distincts en régime stationnaire $23/40^\circ\text{C}$ (données de la Figure 5) et $15/40^\circ\text{C}$. La masse volumique des colonnes 3 et 4 est estimée à partir des mesures de masse ($753 \pm 6 \text{ kg}$) après le conditionnement à 23°C et 50% HR et de volume du béton de terre ($0,398 \pm 0,015 \text{ m}^3$). La masse volumique estimée est cohérente avec celle mesurée sur une éprouvette béton réalisée le même jour que l'éprouvette pour la BCG (1910 kg.m^{-3}). Les essais en BCG ont permis de mesurer la résistance thermique de l'éprouvette à deux reprises : $R = 0,48 \pm 0,04 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ (régime $23/40^\circ\text{C}$) et $0,51 \pm 0,07 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ (régime $15/40^\circ\text{C}$), soit -24% de la valeur théorique calculée à partir des mesures de la colonne 1. Enfin, les résultats de la dernière colonne sont les résultats détaillés dans la partie **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Les résultats du Tableau 1 permettent de montrer les différences d'estimation entre les méthodes de mesure. Une des explications est la différence de conditionnement des éprouvettes et l'échelle des éprouvettes. Néanmoins, malgré le fait que les mesures de conductivité et de résistance thermique en BCG soient cohérentes par méthodes directe et inverse, les mesures par méthode directe présentent une incertitude plus grande que celles par méthode inverse. Aussi, ces résultats montrent que le matériau semble avoir conservé une forte teneur en eau malgré le conditionnement de deux mois.

5. Conclusions

Cet article propose une nouvelle méthodologie pour mesurer les propriétés thermiques d'un matériau sur des bancs d'essais de grande taille et en conditions d'essais proches de conditions *in situ*. Ces premiers résultats montrent une différence significative entre la mesure de la résistance thermique de la paroi et son calcul à partir des propriétés thermiques mesurées sur matériau sec (-24%). Il est donc essentiel d'être capable de disposer de protocoles de mesure fiable pour estimer les propriétés thermiques de matériaux sur des bancs d'essais à échelle réelle et en climat réel et ainsi, fiabiliser les données utilisées dans les modèles. De plus, les estimations par méthodes directe et inverse de la conductivité sont égales : la méthode inverse ayant l'avantage de présenter une incertitude 10 fois plus faible. Enfin, cette méthode permet l'estimation de la capacité thermique du matériau, sur un volume important (15 x 15 cm).

Des mesures de teneur en eau vont être réalisées sur l'éprouvette pour expliquer la forte conductivité thermique, capacité thermique et masse volumique du matériau. Aussi, des mesures en plaque chaude gardée sur un matériau conditionné à 23°C et 50%HR permettront de critiquer les valeurs mesurées au disque chaud.

Références

- [1] M. Sutkowska, A. Stefańska, M. D. Vaverkova, S. Dixit, et A. Thakur, « Recent advances in prefabrication techniques for biobased materials towards a low-carbon future: From modules to sustainability », *J. Build. Eng.*, vol. 91, p. 109558, août 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109558.
- [2] T. Colinart, T. Vinceslas, H. Lenormand, A. H. D. Menibus, E. Hamard, et T. Lecompte, « Hygrothermal properties of light-earth building materials », *J. Build. Eng.*, vol. 29, p. 101134, mai 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2019.101134.
- [3] A. Azil *et al.*, « Earth construction: Field variabilities and laboratory reproducibility », *Constr. Build. Mater.*, vol. 314, p. 125591, janv. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125591.
- [4] S. Idrissi Kaitouni *et al.*, « Energy and hygrothermal performance investigation and enhancement of rammed earth buildings in hot climates: From material to field measurements », *Energy Build.*, vol. 315, p. 114325, juill. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114325.
- [5] AFNOR, « NF EN ISO 8990 Isolation thermique - Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire - Méthode à la boîte chaude gardée et calibrée ».
- [6] CSTB, « Règles Th-bat - Fascicule matériaux », déc. 2017.
- [7] AFNOR, *NF EN ISO 6946 Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods*. 2017.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à David Gaillard et Anaëlle Daurat de la Plateforme Tipée, Laurent Servant de La Rochelle Université, Clément Gaonac'h et Donatién Robert, stagiaires du CESI, Francis Allard, professeur émérite de La Rochelle Université.