

# Etude de la variabilité aléatoire des propriétés hygrothermiques de la bauge aux échelles du matériau et de la paroi

Junior Tchiotsop<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Nantes Université, EC Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire Cedex 1, France

<sup>2</sup> ADEME, BP 90406 49004 Angers Cedex 01, France

## RESUME

La construction en bauge est une technique traditionnelle de construction en terre crue, retrouvée à travers les peuples du monde sous diverses appellations locales. Contrairement aux matériaux conventionnels, le matériau bauge est difficile à caractériser à cause de sa forte variabilité intrinsèque. Et si cette variabilité était en réalité une « méta-propriété » de la bauge ? Je vous propose dans cet article une investigation sur cet aspect du matériau à l'aide des méthodes de caractérisation conventionnelles pour deux propriétés hygrothermiques : la conductivité thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau. Ces mesures seront réalisées aux échelles du matériau (adaptation du protocole de fabrication en laboratoire) et de la paroi (in-situ). A l'échelle du matériau, trois composites à base d'ajouts végétaux (fibres de lin, tiges de foin et chènevotte) ont été testés et ce, pour deux teneurs en fibres (1% et 3%). Les composites de lin réduisent la variabilité de la conductivité thermique du matériau avec un coefficient de variation de 3,34% (FL-1%) contre 4,13% pour le matériau non fibré (WF). Les deux autres ajouts augmentent la variabilité de la conductivité thermique : 7,19% pour les composites à base de foin et 8,18% pour les composites à base de chènevotte. La variabilité de la conductivité thermique des composites augmente avec le taux de fibres. Pour la perméabilité à la vapeur d'eau des composites, un maximum de variabilité fut obtenue pour une teneur en fibre entre 1 et 3%. Des niveaux de représentativité acceptables de la moyenne des propriétés furent obtenus entre les deux échelles, contrairement à la variabilité. Des fonctions densité de probabilité ont été proposées aux deux échelles ainsi que le degré de représentativité de leurs statistiques, utiles pour de futures études probabilistes.

**Mots-clés** Bauge, variabilité aléatoire, conductivité thermique, perméabilité à la vapeur d'eau

## I. INTRODUCTION

Le secteur du résidentiel est responsable de 35% de la consommation énergétique et 38% des émissions des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale (Environment, 2019). Ceci très corrélé au fort usage des matériaux à fort impact environnemental tels le béton et l'acier, du polyuréthane, ayant de faibles performances thermiques et produisant d'énormes quantités de CO<sub>2</sub>.

La construction en bauge, technique ancestrale de construction en terre crue, pourrait relever le défi de la transition énergétique et environnementale. En effet, elle possède une capacité de stockage de la chaleur élevée et pourraient réduire des impacts environnementaux jusqu'à 75% par rapport aux

constructions à base de matériaux cimentaires (Alassaad et al., 2022; Melià et al., 2014). Ces dernières années, la maîtrise des géomatériaux montre qu'ils sont le siège de transferts couplés de chaleur et d'humidité, et force à la recherche des propriétés hygrothermiques, dont les méthodes de mesure en laboratoire sont bien maîtrisées à l'heure actuelle (Philip and De Vries, 1957).

Cependant, contrairement à la plupart des matériaux conventionnels, où la mise en œuvre sur site et l'échantillon représentatif en laboratoire sont bien corrélées, la bauge présente des difficultés, fortement liées à sa mise en œuvre sur site, consistant de manière succincte à (Niroumand et al., 2013) :

- Fouler du pied un mélange de sol, ajouts végétaux et eau, à l'état plastique ;
- Former des mottes de terre et les assembler en couches successives de 30 à 60 cm environ, en laissant sécher les couches 2-3 jours en fonction du climat local.

La paroi finie présente ainsi beaucoup d'hétérogénéité, d'ailleurs très visible en surface : zones fissurées (i), teneurs en ajout végétal différentes (ii), gravillons arrachés (iii), limites des couches (iv), etc. De plus, à chaque couche, des énergies de compactage non maîtrisées sont appliquées pour limiter les pores dans le mur fini (coups de pelles/trident par exemple). Ainsi, représenter l'échantillon au laboratoire s'avère être une tâche complexe.

Par ailleurs, très peu de travaux abordent cette problématique. La solution actuellement adoptée est de proposer des énergies de compactages maîtrisées en laboratoire, offrant les propriétés physiques et mécaniques moyens du matériau sur site, nonobstant des coefficients correcteurs (Azil et al., 2022; Sangma et al., 2022). Ces approches sont faibles, car annihilent la caractéristique « variable » du matériau. En effet, en moyennant les mesures sur un faible nombre d'échantillons (3 à 6), prélevés sur une paroi en bauge, il est difficile de représenter totalement l'ensemble des hétérogénéités locales de la paroi.

Dans cet article, l'approche envisagée est d'accepter la variabilité aléatoire des propriétés de la bauge comme faisant partie intégrante du matériau et de l'étudier à partir des essais de reproductibilité sur plusieurs échantillons de la même formulation (échelle du matériau). Les études seront menées pour une propriété de transfert thermique (**la conductivité thermique**) et une propriété de transfert hydrique (**la perméabilité à la vapeur d'eau**), à l'échelle du matériau et pour plusieurs espèces d'ajout végétal. Ensuite, pour la formulation à base d'ajouts de chènevottes, nous allons mener une étude **à l'échelle de la paroi**. En effet, une paroi de 3 m<sup>2</sup> sera construite et carottée à afin de procéder à une évaluation de la représentativité du protocole de fabrication des échantillons en laboratoire.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

Le sol utilisé est un déchet d'excavation provenant de l'éco-quartier « Maison Neuve » de Guérande (France). C'est un sable-limoneux contenant 8% d'argile, 47% de limons et 45% de sable (Selon la NF EN ISO 17892-4, 2018). A partir des corrélations faites des données de la littérature, il a été démontré qu'il est parfaitement adapté à la construction en bauge (Tchiotsop et al., 2022). Les composites ont été fabriqués à partir de trois types d'ajouts végétaux : les fibres de lin, les tiges de

foin et la chènevotte. Leur paramètres physiques sont décrits dans (Tchiotsop et al., 2022). Les fibres ont été coupées à 5 cm environ (sauf la fibre de chènevotte qui est déjà calibré par le fabricant CHANVRIBAT) Deux (02) formulations correspondantes à deux teneurs en fibres<sup>a</sup> (1% et 3%) ont été réalisées pour chaque ajout (TABLEAU 1).

Cependant, pour l'étude à l'échelle de la paroi, la formulation He-3% fut retenue étant donné qu'elle a affichée la plus forte variabilité des propriétés à l'échelle du matériau (partie III.A) et surtout, parce qu'elle est accessible sur le marché français pour des études approfondies (matériau commercialisé et bien calibré des points de vue physique et minéralogiques).

TABLEAU 1. Composites étudiées

Formulation	Composite :	Teneur en fibre (g/kg de sol sec)	Teneur en eau du mélange frais (%)	Masse volumique sèche moyenne (kg/m <sup>3</sup> )
WF	non fibrée	0	19	1837
FL-1%	Fibres de lin à 1%	10	23	1845
Ha-1%	Tiges de foin à 1%	10	24	1749
He-1%	Chènevotte à 1%	10	25	1709
FL-3%	Fibres de lin à 3%	30	24	1733
Ha-3%	Tiges de foin à 3%	30	23	1471
He-3%	Chènevotte à 3%	30	23	153

### B. Fabrication des échantillons et de la paroi en bauge

En vue de fabriquer le matériau, les différentes étapes du protocole de fabrication sur chantier ont été représentées en laboratoire :

- « le foulage au pied du mélange successif terre-fibre-eau » a été représenté par un pétrissage au fouet du mélange, dans un malaxeur (similaire à celui de la fabrication de la pâte à pain). Une teneur en eau de 19% fut rajouté pour le pétrissage du sol uniquement, et par la suite des fibres humidifiées pendant 10 minutes afin d'obtenir une consistance uniforme entre les formulations (TABLEAU 1). En effet, il a été démontré que la cinétique d'absorption d'eau des fibres végétales se passe durant les premières minutes
- pour la fabrication des échantillons, des moules métalliques ont été utilisés. Deux couches successives de matériaux frais ont été rajoutées en vue de représenter les couches successives sur site. Le compactage aléatoire des couches est représenté par des pressions aléatoires, fait aux doigts. Des échantillons prismatiques de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> sont utilisés pour la conductivité thermique (**18 échantillons**, 4 mesures par échantillon) et des ø100x25mm, pour la perméabilité à la vapeur d'eau (**4 – 9 échantillons**) ;
- la paroi a été réalisée suivant le procédé de la bauge coffrée. Les échantillons furent carottés à sec (ø100mm). Sur chaque carotte, deux échantillons de 25mm et de 45mm d'épaisseurs ont été sciés à l'aide d'une scie meuleuse, pour les essais de perméabilité à la vapeur d'eau (**24 échantillons**, coupelle sèche : 4 – 9 échantillons, Gravitest : 7 échantillons) et de conductivité thermique respectivement (**20 échantillons**, 10 mesures par échantillon).

### C. Méthode de mesure des propriétés et d'estimation de la variabilité

<sup>a</sup> Dans la suite de cette étude, nous utiliserons le terme « fibre » pour désigner toutes les espèces d'ajout végétal

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) a été évaluée à partir de la méthode du disque chaud (HotDisk). L'appareillage est constitué d'une source électrique, d'une sonde (en alliage de Nickel) qui sert en même temps de capteur de température, par mesure du changement de la résistivité. La sonde était de diamètre 12 mm, une puissance de source de 20mW était appliquée à la surface du matériau pendant 20 secondes. La profondeur de pénétration théorique de la chaleur a été vérifiée à chaque test, par rapport aux dimensions de l'échantillon.

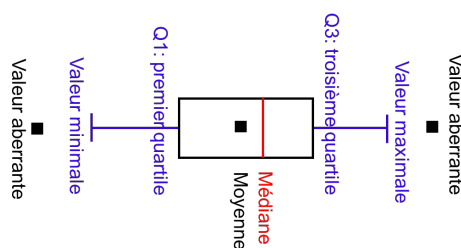
La perméabilité à la vapeur d'eau ( $k_m$ ) fut mesurée et évaluée suivant la norme NF EN 12572 à partir de deux méthodes : la méthode de la coupelle sèche et la méthode du Gravitest. Les tests ont été réalisés à une ambiance de 23°C en température et 50% en humidité relative.



**FIGURE 1.** Echantillons de perméabilité à la vapeur d'eau fabriqués (échelle du matériau) et parois carottée

Comme estimateur de variabilité uni-varié, l'Intervalle QuarTile ( $IQR = Q3 - Q1$ ) et le Coefficient de Variation (CoV) furent utilisés. L'IQR présente l'avantage de s'affranchir des valeurs aberrantes. Les boîtes à moustaches seront ainsi utilisées pour décrire la variabilité (FIGURE 2).

Afin de procéder plus tard à des études probabilistes des modèles de transfert couplés, des Fonctions Densité de Probabilité (FDP) des propriétés ont été proposées. Une comparaison entre les statistiques de ces dernières aux deux échelles a été proposée. Pour cela, la loi Log-normale a été utilisée, étant donnée qu'elle propose la meilleur valeur-p après un test khi-carré ( $\chi^2$ ) sur l'ensemble des valeurs à l'EM et à l'EP.



**FIGURE 2.** Boîte à moustache

### III. RESULTATS

#### A. Echelle du matériau : étude statistique

La FIGURE 3 expose la variabilité de la conductivité thermique de chaque formulation. Les composites de lin à un taux de substitution de 1% (FL-1%) ont montré une moyenne comparable par rapport au matériau non-fibré (WF) de 1,08 et 1,06 W/(m.K), mais une variabilité plus faible (3,34% et 4,13% respectivement). Une observation au microscope optique de l'état de surface interne

des formulations a été réalisée dans (Tchiotsop et al., 2022). En effet, la faible variabilité s’explique par la texture fine des fibres de lin, extraite des cellules de tige de lin, qui remplissent les pores du matériau non-fibré : le matériau ainsi obtenu est plus homogène. Contrairement au composite de lin, ceux de chènevotte et de foin montre une augmentation de variabilité de la conductivité thermique. L’observation au microscope des échantillons montre que les composites de chènevotte et de foin ont une distribution de taille de pores variée. De plus, une adhérence moins forte est remarquée entre les fibres et la matrice terre, en comparaison avec l’adhérence des fibres de lin.

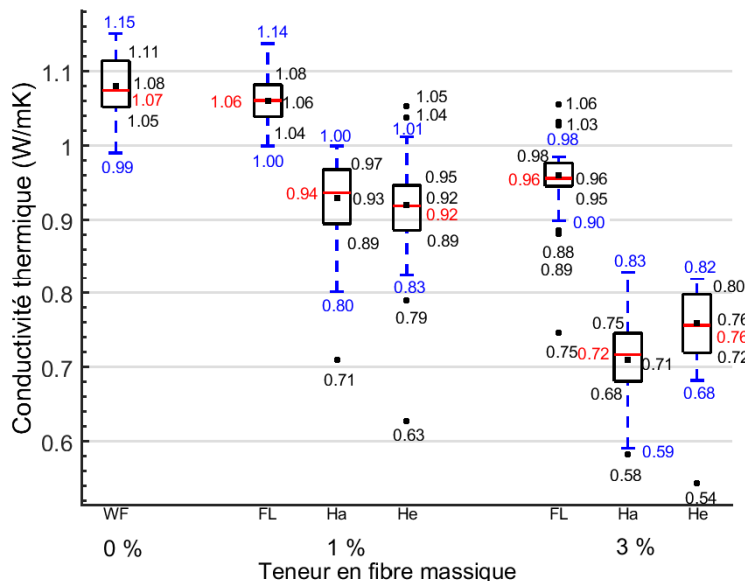


FIGURE 3. Variabilité de la conductivité thermique des formulations étudiées à l’échelle du matériau

TABLEAU 2. Statistiques des propriétés hygrothermiques des formulations étudiées

Propriétés		WF	FL-1%	FL-3%	Ha-1%	Ha-3%	He-1%	He-3%
<b>Moyenne (M)</b>								
Conductivité thermique (W/(m.K))		1,08	1,06	0,96	0,93	0,71	0,92	0,76
Perméabilité à la vapeur (kg/(m.s.Pa))	Coupelle	9,13. 10 <sup>-12</sup>	8,69. 10 <sup>-12</sup>	6,48. 10 <sup>-11</sup>	1,32. 10 <sup>-11</sup>	1,05. 10 <sup>-11</sup>	1,14. 10 <sup>-11</sup>	1,05. 10 <sup>-11</sup>
	Gravitest	8,26.10 <sup>-12</sup>	8,26.10 <sup>-12</sup>	-	7,51.10 <sup>-12</sup>	-	9,01.10 <sup>-12</sup>	-
	Total	8,46.10 <sup>-12</sup>	8,65. 10 <sup>-12</sup>	6,48. 10 <sup>-11</sup>	9,66. 10 <sup>-12</sup>	1,05. 10 <sup>-11</sup>	1,01. 10 <sup>-11</sup>	1,05. 10 <sup>-11</sup>
<b>Intervalle quartile (IQR)</b>								
Conductivité thermique (W/(m.K))		0,062	0,043	0,031	0,073	0,065	0,061	0,079
<b>Coefficients de variation (%)</b>								
Conductivité thermique (W/(m.K))		4,13	3,34	7,19	8,18	9,37	10,89	11,06
Perméabilité à la vapeur	Coupelle	4,49	55,73	26,71	15,84	26,90	50,05	18,49
	Gravitest	16,30	13,92	-	25,09	-	7,25	-
	Total	11,71	35,66	26,71	36,02	26,90	37,09	18,49

Quel que soit l’estimateur de variabilité, le composite de chènevotte affiche la plus grande variabilité, parmi les composites à 1% et 3% (TABLEAU 2). Cela est certainement dû à la variation de longueur des ajouts de chènevottes, entre 25 et 50mm (Viel et al., 2019). En effet, plusieurs

travaux ont mis en évidence la corrélation négative entre la conductivité thermique des matériaux en terre crue et la longueur des ajouts végétaux (Ba et al., 2021; Laibi et al., 2018; Millogo et al., 2014). En nous basant sur l'IQR comme estimateur de la variabilité, un accroissement avec la teneur en fibre de la variabilité de la conductivité thermique a été remarqué pour les composites de foin et de chènevottes. Pour les premiers, un accroissement de  $\frac{IQR, \lambda_{Ha-3\%} - IQR, \lambda_{Ha-1\%}}{IQR, \lambda_{Ha-1\%}} = 15\%$  (IQR de 8,18% à 9,37%) et pour les seconds, un accroissement de 2% (IQR de 10,89 à 11,06%). En utilisant le Coefficient de Variation (CoV) comme estimateur de la variabilité l'on note un accroissement de 115% pour les composites de lin. Cela est dû au nombre important de valeurs aberrantes de la formulation FL-3% (5 valeurs).

Le TABLEAU 2 affiche aussi les statistiques de la perméabilité à la vapeur ( $k_m$ ) pour les formulations étudiées. En comparant les moyennes des essais à la coupelle sèche et au Gravitest, l'on note des écarts non négligeables pour les formulations Ha-1% et He-1% ( $5,69 \cdot 10^{-12}$  et  $2,39 \cdot 10^{-12}$  kg/(m.s.Pa) respectivement). Cependant avec WF et FL-1%, de faibles écarts de  $0,87 \cdot 10^{-12}$  et de  $0,43 \cdot 10^{-12}$  kg/(m.s.Pa) ont été calculés. Ainsi, comme avec la conductivité thermique, l'écart est d'autant plus faible que le matériau est homogène. Etant donné le faible nombre d'échantillons, le calcul de l'intervalle quartile n'est pas approprié. Contrairement à  $\lambda$ , de fortes variabilités (CoV) ont été calculées. Le matériau non fibré a eu la plus faible variabilité et aucune tendance monotone avec la teneur en fibre n'a été identifiée. En effet, l'on remarque qu'il existe probablement des teneurs en fibres intermédiaire pour lesquelles l'on obtient un maximum de variabilité. En nous référant à la variabilité sur l'ensemble des échantillons, cette teneur en fibre est comprise entre 1 et 3% pour tous les composites. Cependant, un nombre d'essai plus conséquent devrait être réalisé pour confirmer cette hypothèse.

#### B. Echelle de la paroi : étude statistique et degré de représentativité des propriétés

Le TABLEAU 3 résume les statistiques de la variabilité des propriétés aux deux échelles pour la formulation He-3%. Des valeurs similaires ont été retrouvées pour la moyenne de la conductivité thermique : 0,76 W/(m.K) à l'Echelle du Matériau (EM) et 0,74 W/(m.K) à l'Echelle de la Paroi (EP). Néanmoins, un écart plus important de  $2,96 \cdot 10^{-12}$  kg/(m.s.Pa) est calculé sur les moyennes de  $k_m$ . A l'échelle de la paroi l'on note un accroissement de la variabilité des propriétés par rapport à l'échelle du matériau (CoV) : de 11% pour  $\lambda$  (11,06% à 12,30%) et de 82% pour  $k_m$  (18,49% à 33,74%). Cependant, les statistiques de  $k_m$  sont aussi influencées par le nombre d'échantillons (9 à l'EM et 22 à l'EP). Sous réserve de cette analyse, cette étude montre que la méthode de fabrication des échantillons pour  $k_m$  devrait être améliorée. Par ailleurs, une tendance d'évolution de la conductivité thermique avec la hauteur de la paroi a été identifiée, contrairement à la perméabilité à la vapeur. Deux courbes ont été identifiées : l'une en éliminant les mesures aux bords supérieurs et inférieurs de la paroi ( $\lambda = 0,0033y + 0,584$ ) et l'autre en prenant en compte toutes les mesures ( $\lambda = 0,0023y + 0,699$ ).

TABLEAU 3. Statistiques de la variabilité des propriétés hygrothermiques aux deux échelles pour He-3%

Echelle d'étude	Moyenne (M)		Intervalle quartile (IQR)		Coefficient de Variation (CoV)	
	E.M.	E.P.	E.M.	E.P.	E.M.	E.P.
Conductivité thermique $\lambda$ (W/(m.K.))	0,76	0,74	0,079	0,098	11,06	12,30

Perméabilité à la vapeur (kg/(m.s.Pa))	8,94.10 <sup>-12</sup>	1,19.10 <sup>-11</sup>	3,01.10 <sup>-12</sup>	5,50.10 <sup>-12</sup>	18,49	33,74
--	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------	-------

C. Fonctions densité de probabilité (FDPs)

Toujours en vue de procéder à des simulations probabilistes, des fonctions densité de probabilités ont été proposées. La FIGURE 4 illustre les FDPs aux deux échelles<sup>b</sup> et le TABLEAU 4, les statistiques de ces fonctions (moyenne et CoV) et les Degrés de Représentativité (DR) de ces dernières (statistique à l’EMx100/statistique à l’EP). Plus DR se rapproche de 100%, plus les études aux deux échelles sont similaires.

Ainsi, des DR de 102% et de 7% ont été obtenus pour la moyenne (M) et le Coefficient de Variation (CoV) de la conductivité thermique. Des valeurs de 73% et 42% ont été obtenus pour M et CoV de la perméabilité à la vapeur d’eau. Comme retrouvé précédemment, les faibles représentativités du CoV indiquent qu’une amélioration de la fabrication des échantillons en laboratoire est nécessaire.

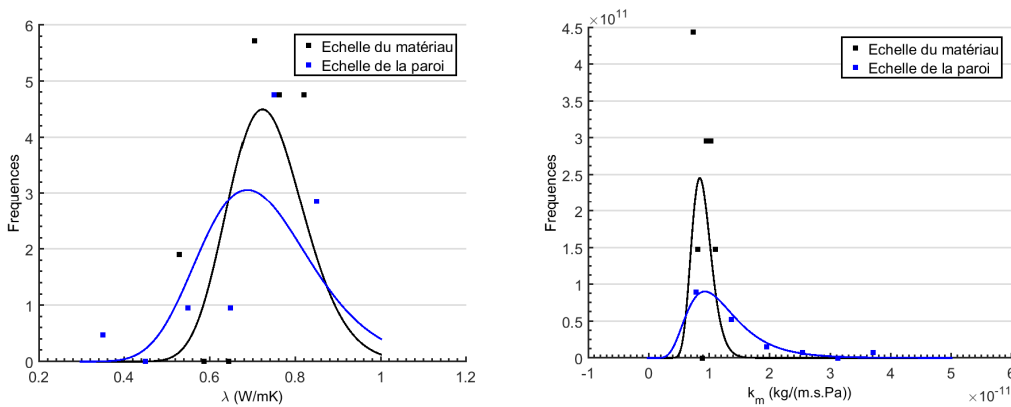


FIGURE 4. Fonctions densité de probabilité des propriétés

TABLEAU 4. Statistiques des FDPs

Propriétés	EM		EP		DR (EMx100/EP)	
	M	CoV (%)	M	CoV (%)	M	CoV (%)
$\lambda$ (W/(m.K))	0,74	12,21	0,73	18,76	102	65
$k_m$ (kg/(m.s.Pa))	8,96.10 <sup>-12</sup>	18,94	1,23.10 <sup>-11</sup>	45,20	73	42

III. CONCLUSION

Ce travail met en évidence l’intérêt de l’étude de la variabilité naturelle des propriétés hygrothermiques de la bauge. En effet, elle montre que les méthodes déterministes de simulation des transferts de chaleur et/ou d’humidité sont insuffisantes.

En procédant à des mesures à l’échelle du matériau, une confrontation entre les formulations WF et FL-1% par exemple affiche des moyennes similaires, mais la différence est marquée au niveau de

<sup>b</sup> Il est à noter que les données utilisées pour  $k_m$  sont l’ensemble des mesures au Gravitest et à la coupelle

la variabilité. Les formulations à base de tiges de foin et de chènevottes affichent des variabilités aléatoires plus importantes, liée à la microstructure même des matériaux.

En comparaison à des mesures réalisées à l'échelle de la paroi, d'excellents niveaux de représentativité ont été obtenus sur la moyenne des propriétés, contrairement aux indicateurs de variabilité, démontrant ainsi une nécessité d'améliorer le protocole de fabrication.

Enfin, fonctions densité de probabilité ont été proposées afin de procéder plus tard, à des études probabilistes du comportement hygrothermique des parois en bauge, ainsi que l'étude énergétique des bâtiments en bauge. Le degré de représentativité de la statistique « Moyenne » des FDPs des propriétés fut satisfaisant, contrairement la statistique « CoV ».

## REFERENCES

- Alassaad, F., Touati, K., Levacher, D., Mendili, Y.E., Sebaibi, N., 2022. Improvement of cob thermal inertia by latent heat storage and its implication on energy consumption. *Construction and Building Materials* 329, 127163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127163>
- Azil, A., Le Guern, M., Touati, K., Sebaibi, N., Boutouil, M., Streiff, F., Goodhew, S., Gomina, M., 2022. Earth construction: Field variabilities and laboratory reproducibility. *Construction and Building Materials* 314, 125591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125591>
- Ba, L., El Abbassi, I., Ngo, T.-T., Pliya, P., Kane, C.S.E., Darcherif, A.-M., Ndong, M., 2021. Experimental Investigation of Thermal and Mechanical Properties of Clay Reinforced with *Typha australis*: Influence of Length and Percentage of Fibers. *Waste Biomass Valor* 12, 2723–2737. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01193-0>
- Barnaure, M., Poullain, P., Stéphanie, B., 2019. Earth buildings with local materials: Assessing the variability of properties. *FIB Symposium*.
- Clerc, R., Mestapha, O., Schoefs, F., 2019. SCAP-1D : A Spatial Correlation Assessment Procedure from Unidimensional Discrete Data. *Reliability Engineering & System Safety* 191, 106498. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106498>
- Environment, U.N., 2019. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction Sector. UNEP - UN Environment Programme.
- Issaadi, N., 2015. Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste (phdthesis). Université de La Rochelle ; École Royale Militaire (Bruxelles).
- Laibi, A.B., Poullain, P., Leklou, N., Gomina, M., Sohounhoulou, D.K.C., 2018. Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB). *KSCE J Civ Eng* 22, 785–793. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1968-9>
- Larrard, T. de, 2010. Variabilité des propriétés du béton : caractérisation expérimentale et modélisation probabiliste de la lixiviation (phdthesis). École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., Dotelli, G., 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production* 80, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>
- Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., Ghavami, K., 2014. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with *Hibiscus cannabinus* fibers. *Construction and Building Materials* 52, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Niroumand, H., Zain, M.F.M., Jamil, M., 2013. Various Types of Earth Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2nd Cyprus International Conference on Educational Research (CY-ICER 2013) 89, 226–230. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.839>
- Philip, J.R., De Vries, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. AGU* 38, 222. <https://doi.org/10.1029/TR038i002p00222>
- Sangma, S., Tripura, D.D., Deshmukh, A., Shaikh, A., 2022. A study on cob sample production and techniques. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering* 1–11. <https://doi.org/10.1680/jfoen.22.00022>
- Tehiotop, J., Issaadi, N., Poullain, P., Bonnet, S., Belarbi, R., 2022. Assessment of the natural variability of cob buildings hygric and thermal properties at material scale: Influence of plants add-ons. *Construction and Building Materials* 342, 127922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127922>
- Viel, M., Collet, F., Pretot, S., Lanos, C., 2019. Hemp-Straw Composites: Gluing Study and Multi-Physical Characterizations. *Materials* 12, 1199. <https://doi.org/10.3390/ma12081199>