



HAL
open science

Amélioration des performances thermique et énergétique des parois en blocs de terre comprimée: solutions géo et bio-sourcées

Giada Giuffrida, Hamza Allam, Laurent Ibos, Abderrahim Boudenne

► To cite this version:

Giada Giuffrida, Hamza Allam, Laurent Ibos, Abderrahim Boudenne. Amélioration des performances thermique et énergétique des parois en blocs de terre comprimée: solutions géo et bio-sourcées. Congrès Français du Génie Civil : Ville du futur et changement climatique CFGC 2023, May 2023, Paris Saclay, France. hal-04779819

HAL Id: hal-04779819

<https://hal.science/hal-04779819v1>

Submitted on 13 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Amélioration des performances thermique et énergétique des parois en blocs de terre comprimée: solutions géo et bio-sourcées

Giada Giuffrida^{a*}, Hamza Allam^b, Laurent Ibos^b, Abderrahim Boudenne^a

a Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-94010 Creteil, France

b Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-77567 Lieusaint, France

* Auteur correspondant : giada.giuffrida@u-pec.fr

RESUME La préoccupation croissante concernant l'impact environnemental de la construction contemporaine a mis l'accent sur la nécessité d'adopter de nouvelles technologies durables avec une énergie intrinsèque plus faible et une production de déchets minimisée, comme celles basées sur l'utilisation de matériaux en terre crue. Aujourd'hui, le principal défi pour les constructions en terre crue est de garantir des performances énergétiques satisfaisantes qui pourraient permettre une réelle concurrence avec les matériaux de construction conventionnels (plus polluants). Pour cette raison, ce travail se concentre sur l'analyse des performances des blocs de terre comprimée (BTC) commercialisés pour la construction des enveloppes verticales massives, avec une inertie thermique élevée, mais une résistance thermique à optimiser. Afin de surmonter ce problème, ce travail propose plusieurs solutions de construction de murs en BTC utilisant des isolants bio-sourcés compatibles, qui permettent une réponse énergétique mieux adaptée aux normes énergétiques européennes actuelles. Plus en détail, ce travail rapporte les premiers résultats de la caractérisation expérimentale des murs en BTC, comprenant les principales propriétés thermiques et hygrométriques, nécessaires à la compréhension de leur comportement, en vue de leur combinaison avec plusieurs isolants thermiques bio-sourcés.

Mots-clés Construction en terre crue ; blocs de terre comprimée ; analyse des performances ; comportement thermique et hydrique.

I. INTRODUCTION

La préoccupation croissante concernant l'impact environnemental du secteur de la construction contemporaine a mis l'accent sur la nécessité d'adopter de nouvelles technologies de construction durables avec une énergie intrinsèque plus faible, une efficacité énergétique plus élevée et une production de déchets minimisée. Dans ce contexte, la construction bio et geosourcée et en particulier la construction en terre crue sont des domaines prometteurs qui reposent sur l'utilisation de matériaux peu coûteux, caractérisés par leur grande disponibilité, leur non-toxicité, leurs processus de production *low-tech* et leur recyclabilité (Giuffrida et al, 2019). Comme le soulignent plusieurs travaux réalisés au cours des dernières décennies (Houben et Guillaud, 2006), la large gamme de technologies de construction en terre montre une grande adaptation à plusieurs conditions climatiques (climat chaud et tempéré, mais aussi continental), géographiques (zones

sisimiques ou non) et aux propriétés des matériaux de base disponibles localement. Les applications prometteuses des technologies de construction en terre crue explorent les possibilités d'industrialisation, de préfabrication, de mécanisation et de numérisation (Schweiker et al, 2021 ; Gomaa et al, 2022). Il est de plus nécessaire d'accroître la fiabilité, les performances et la rationalisation des processus de production et de construction, sans négliger la rentabilité du produit fini. Plusieurs entreprises du secteur de la construction se sont tournées vers la production de matériaux contemporains en terre crue : parmi celles-ci, l'expérience pionnière de Cycle Terre (Paris) se distingue. En effet, elle a fixé sa production de blocs de terre comprimée, de mortiers et d'enduits à base de terre, sur les matériaux issus des excavations du réseau d'infrastructure du Grand Paris (Guide de conception et de construction, Cycle Terre). Afin d'adapter les performances des éléments de construction en terre crue aux exigences énergétiques élevées déterminées par les réglementations actuelles, il existe un besoin accru de travaux de recherche concernant d'une part l'évaluation des performances du matériau et d'autre part son comportement à l'échelle de la paroi et du bâtiment (par exemple au moyen de simulations numériques). Dans ce sens, l'étude des performances thermiques et hygrométriques des murs de façade en terre crue est fondamentale et, afin d'améliorer leur résistance thermique sans réduire leur inertie thermique, il semble prometteur de les combiner avec des couches extérieures d'isolants thermiques (Giuffrida et al, 2021 ; Goodhew et al, 2021) caractérisées par des propriétés environnementales et hygrothermiques comparables. Ce travail concerne la caractérisation initiale physique, thermique et hygrométrique des blocs de terre comprimée (dénommés BTCs) actuellement commercialisés par l'entreprise partenaire Cycle Terre. Les BTCs étudiés vont constituer la paroi de base qui sera étudiée au moyen de mesures à l'échelle réelle dans un équipement de boîte chaude gardée; les développements ultérieurs se concentreront sur l'évaluation et la prédiction des performances thermiques au moyen de simulations numériques de parois de BTCs isolées avec des matériaux d'isolation biosourcés.

II. MATERIAUX ET METHODES

Les blocs de terre comprimée ont été fournis par l'entreprise partenaire Cycle Terre. Ces blocs sont conçus pour plusieurs applications, notamment pour des murs porteurs (pour les bâtiments à un ou deux étages), leur résistance à la compression étant d'au moins 2.00 MPa, mais aussi pour les applications de murs massifs en combinaison avec une ossature porteuse et enfin comme parement. Les BTCs sont réalisés en différentes tailles selon l'application, mais tous utilisent un mélange composé d'au moins 65% de terre crue (composée d'argiles, de limons, de sables et de petits graviers) et 35% de sable de la région parisienne (fiche technique Cycle Terre), avec un diamètre maximum de 6 mm.



FIGURE 1. Blocs en terre comprimée étudiés (gauche) et surface du bloc (droite)

La caractérisation du matériau proposée dans cet article concerne les propriétés physiques comme la masse volumique à l'état sec, et les propriétés hygrothermiques comme la conductivité thermique dépendant de l'humidité, la capacité thermique massique, l'isotherme de sorption et le coefficient d'absorption d'eau. Ce sont toutes des propriétés fondamentales du matériau, utiles pour décrire le comportement hygrothermique des matériaux poreux à des humidités faibles, moyennes et élevées, lors d'un transport couplé de chaleur et de masse à l'intérieur du matériau, ce dernier étant régi par la diffusion de vapeur seule à très faible humidité, par un mélange de gaz et d'eau dans le domaine hygroscopique, et par le transport de liquide au-dessus de 95% d'humidité relative (NF EN ISO 15148: 2003).

La masse volumique à l'état sec des BTCs a été déterminée selon la méthode (XP P 13 901:2022), après séchage des échantillons en étuve à 70 °C (environ 7% d'humidité relative), jusqu'à atteindre un poids constant, en considérant un état d'équilibre lorsque $m_{(t, t+24)} < 0.2\%$.

La porosité des BTCs a été estimée par la méthode suivante :

$$n(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{apparente}}{\rho_{absolue}}\right) \times 100$$

La conductivité thermique, dépendante de la teneur en eau, a été évaluée après conditionnement d'échantillons de 2 cm d'épaisseur découpés des BTCs et laissés dans une enceinte climatique à une température constante de $T=20^{\circ}\text{C}$, alors que les humidités relatives étaient successivement augmentées (Bruno et al. 2020, Giuffrida et al. 2023), et en mesurant la conductivité thermique lorsque leur masse s'est stabilisée ($m_{(t, t+24)} < 0,1\%$). Les échantillons ont été maintenus dans l'enceinte climatique puis testés avec un dispositif de type Hot Disk (NF EN ISO 22007-2), une méthode transitoire utilisant une sonde plane qui sert à la fois de dispositif de chauffage et de capteur de température. La sonde est placée entre deux échantillons identiques, lisses et plats, afin d'éviter tout contact avec l'air. Pour la mesure a été utilisée la sonde Kapton 5501, de rayon 6.403 mm, avec une puissance de 90 mW et un temps de mesure de 80s. Cette méthode de mesure permet de déterminer la conductivité thermique et la capacité thermique pour n'importe quelle teneur en eau, avec une procédure rapide et fiable.

L'isotherme de sorption est évalué conformément à la norme NF EN ISO 12751:2021 ; en particulier, l'étape de sorption consiste à placer successivement un échantillon préalablement séché (à 70 °C jusqu'à stabilisation de la masse $m_{(t, t+24)} < 0,1\%$), dans plusieurs environnements à humidité relative croissante et à température constante. Dans ce cas, la température choisie est de 20°C, et les humidités relatives sont de 12,5%, 25%, 60%, 80% et 95%. L'échantillon est pesé périodiquement, et il reste dans un environnement donné jusqu'à l'obtention d'une masse constante ($m_{(t, t+24)} < 0,1\%$).

Le coefficient d'absorption d'eau A_w dû à l'action capillaire est déterminé par immersion partielle selon la norme NF EN ISO 15148:2003. Compte tenu de l'extrême affinité des BTCs non stabilisés étudiés avec l'eau, dans cette étude le contact avec l'eau a été médiatisé au moyen d'un panier perforé équipé de papier absorbant, afin que l'eau puisse passer sans toutefois provoquer de perte de matière dans l'eau. Des approches similaires ont déjà été utilisées dans la littérature, où le contact du bloc avec l'eau a été médié, par exemple, par une éponge ou du sable humides (Du et al. 2022, Guihéneuf et al. 2020, Eires et al. 2017, Costi de Castrillo et al. 2021). Les échantillons séchés en

étuve (à 70 °C jusqu'à stabilisation de la masse $m(t, t+24) < 0,1 \%$) sont ainsi mis en contact avec le niveau d'eau de 5 mm et laissés à tremper pendant une durée adaptée. Les échantillons sont retirés de l'eau et pesés à des intervalles de temps préétablis. Les résultats sont exprimés sous forme de rapport entre la variation de masse et la surface de base, puis tracés en fonction de \sqrt{t} pour calculer le coefficient d'absorption d'eau.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Après séchage, la masse volumique sèche des BTCs se situe entre 1842 kg/m³ et 2171 kg/m³, avec une valeur moyenne de 2006.5 kg/m³, conformément aux informations fournies par le producteur. La teneur en eau à l'humidité ambiante est égale à 2 %. La valeur de la masse volumique sèche a également été utilisée pour le calcul de la porosité totale des BTCs, pour laquelle une masse volumique absolue de 2,53 Kg/L a été déterminée comme la moyenne de trois essais au pycnomètre. La porosité moyenne estimée des BTCs est alors trouvée égale à 17,5 %, ce qui confirme la bonne répartition granulométrique et un compactage élevé par rapport aux autres blocs en terre, évalué par ailleurs à environ 33,6 % (Bruno et al, 2020).

La conductivité thermique et la capacité thermique massique des BTCs ont été évaluées à l'intérieur de la chambre climatique, à la fois pour les échantillons coupés longitudinalement à la direction du flux de chaleur dans les murs réels (échantillons L) et pour les échantillons coupés perpendiculairement à la direction du flux de chaleur (échantillons T). Dans la figure 2, les valeurs de conductivité thermique sont tracées par rapport aux valeurs de masse volumique apparente pour chaque condition d'humidité relative. Les valeurs indiquées sont la moyenne de six mesures effectuées sur différents empilements de BTCs.

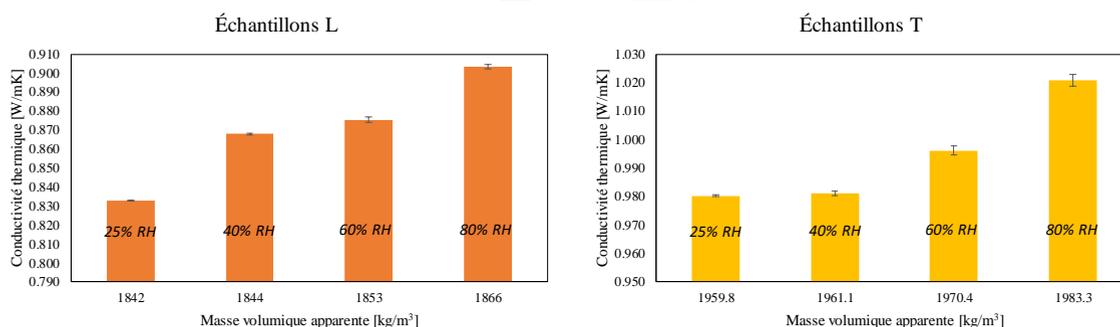


FIGURE 2. Conductivité thermique en fonction des valeurs de masse volumique apparente des BTC étudiés

Les échantillons L présentent des conductivités similaires pour les différentes conditions d'humidité relative, avec des valeurs allant de 0.833 W/mK à 0.873 W/mK à 25 % HR, de 0.866 W/mK à 0.869 W/mK à 40 % HR, de 0.874 W/mK à 0.878 W/mK à 60% HR, de 0.901 à 0.905 W/mK à 80% HR. En revanche, les échantillons T présentent des conductivités thermiques plus élevées allant de 0.979 W/mK à 0.981 W/mK à 25 % HR, de 0.980 W/mK à 0.982 W/mK à 40 % HR, de 0.993 W/mK à 0.998 W/mK à 80 % et de 1.018 W/mK à 1.025 W/mK à 80%RH. Cette différence de performance est apparemment due à une masse volumique plus élevée des échantillons T (pour qui on obtient des masses volumiques que vont de 1958.8 kg/m³ -à 25%RH- à 1983 kg/m³ -à 80%RH- par rapport aux

échantillons L que présentent des masses volumiques de 1842 kg/m^3 -à 25%RH- à 1866 kg/m^3 -à 80%RH-), ce qui est probablement une conséquence du processus de production des BTCs. Cette inhomogénéité des performances est intéressante car elle pourrait avoir des conséquences directes dans des murs bâtis grandeurs nature où les BTCs peuvent être disposés aussi bien dans le sens longitudinal (simple paroi), que dans le sens transversal (double paroi).

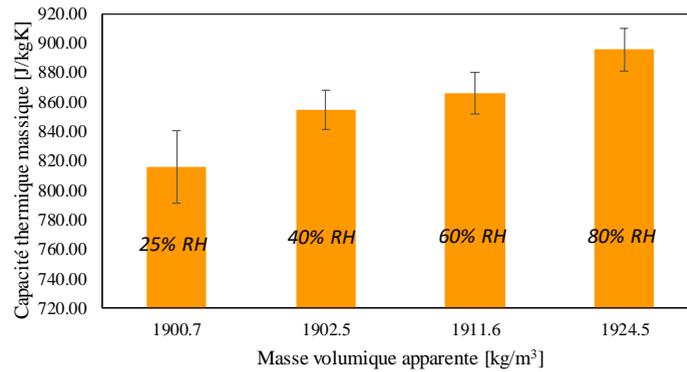


FIGURE 3. Valeurs de capacité thermique massique par rapport aux valeurs de masse volumique apparente des BTC étudiés

La figure 3 présente la capacité thermique massique tracée par rapport aux valeurs de masse volumique apparente pour chacune des différentes conditions d'humidité relative. Même dans ce cas, la forte hygroscopicité des échantillons de BTCs a un effet sur la variation de la capacité thermique massique des BTCs. En effet, ces valeurs vont de 799 à 896 J/kg K pour les échantillons étudiés.

Comme on le sait, dans la région hygroscopique, jusqu'à environ 95 % d'humidité relative, un mélange de gaz et d'eau remplit les pores du matériau. L'isotherme de sorption évaluée à $T=20^\circ\text{C}$ a montré la capacité des BTCs à stocker l'humidité, avec une augmentation moyenne de l'humidité massique de 0.297 %HR à 25%HR, 1.183 %HR à 60%HR, 1.957% à 80%HR et 3.704 à 95% HR dans le domaine hygroscopique (voir figure 4).

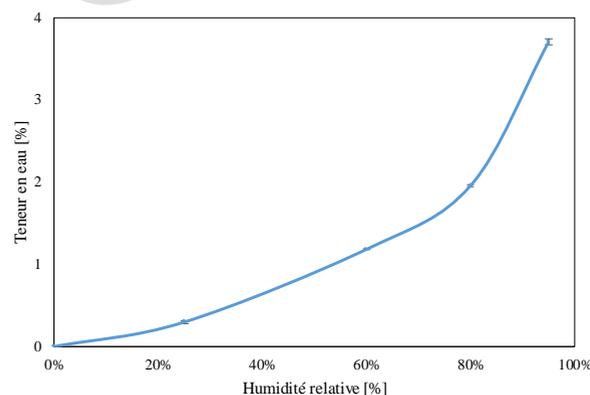


FIGURE 4. Isotherme de sorption moyenne des BTC étudiés

Au-dessus de 95% d'humidité relative, le transport de masse est régi par le transport en phase liquide, il est donc nécessaire d'évaluer le coefficient d'absorption d'eau pour comprendre la sensibilité du matériau à ce phénomène. En effet, le test de base doit être adapté afin de faciliter la pesée des échantillons à différents intervalles de temps, en utilisant des récipients perforés (qui

facilitent la manipulation) et un papier filtre, qui laissent passer l'eau, tout en évitant les pertes de matière. La figure 5 montre la courbe d'absorption d'eau par capillarité de trois échantillons de BTC. La valeur A_w moyenne, calculée après 24h, est $0.14 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.

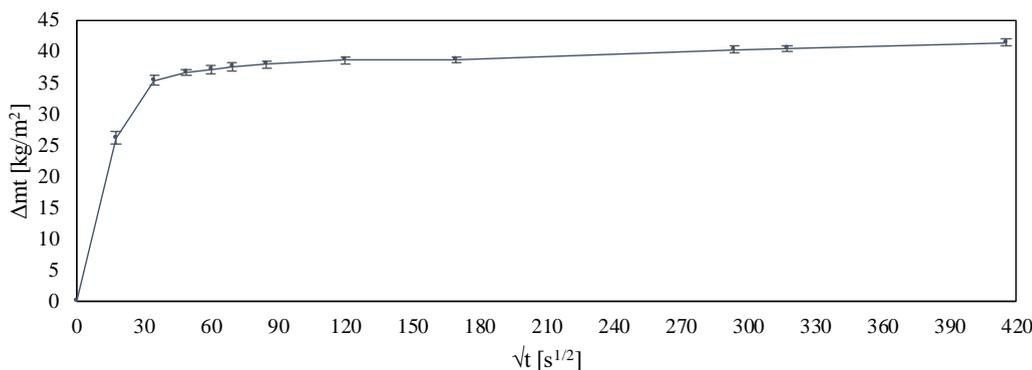


FIGURE 5. Courbe d'absorption d'eau des BTC étudiés

IV. CONCLUSION

Ce travail a permis de présenter les premiers résultats d'une campagne de caractérisation qui vise à évaluer les principales propriétés hygrothermiques de blocs de terre comprimée destinés à être utilisés dans des solutions de maçonnerie pour enveloppes. Les BTCs analysés sont fournis par la société Cycle Terre et réalisés avec des matériaux issus du chantier du réseau d'infrastructures du Grand Paris. Plus en détail, ce travail fait partie d'une recherche plus large qui vise à évaluer la compatibilité hygrothermique entre les murs en blocs de terre comprimée et les isolations thermiques biosourcées au moyen d'essais grandeur nature à l'intérieur d'une boîte chaude gardée et de simulations numériques basées sur des données expérimentales.

Le manuscrit rapporte les premiers résultats de la caractérisation expérimentale des BTCs analysés, comprenant les principales propriétés physiques (masse volumique à l'état sec, porosité), thermiques (capacité thermique massique, conductivité thermique) et hygrométriques (isotherme de sorption, absorption d'eau capillaire). Comme nous l'avons dit, ces données expérimentales seront utilisées ultérieurement pour la mise en œuvre de simulations hygrothermiques qui permettront une compréhension plus approfondie du comportement des matériaux de construction en terre crue en vue de leur combinaison avec plusieurs isolations thermiques biosourcées.

La caractérisation des matériaux proposée dans cet article permet d'affirmer que les BTCs étudiés ont :

- Une masse volumique sèche comprise entre 1842 kg/m^3 et 2171 kg/m^3 , avec une valeur moyenne de 2089 kg/m^3 , conforme aux informations fournies par le producteur. La teneur en humidité naturelle à humidité ambiante (50%-60%) s'avère égale à 2%.
- Une porosité totale des BTC relevée à 17.5%, qui confirme la bonne répartition granulométrique et la forte compaction qu'ils subissent par rapport aux autres blocs crus et cuits.

- Des conductivités thermiques dépendantes de l'humidité allant de 0.833 à 0.905 W/mK pour les échantillons L (échantillons coupés dans le sens longitudinal du BTC) et de 0.979 à 1.025 W/mK pour les échantillons T (échantillons coupés dans le sens transversal du BTC). Cette différence de performance est apparemment due à une densité plus élevée d'échantillons coupés parallèlement à la petite dimension du bloc, comme le sont les échantillons T, ce qui est probablement une conséquence de leur processus de production.
- Des valeurs de capacité thermique massique allant de 799 à 896 J/kg K pour des valeurs croissantes d'humidité relative.
- Une augmentation de la teneur en humidité massique de 0.297 à 25 % HR, 1.183 à 60 % HR, 1.957 % à 80 % HR et 3.704 à 95 % HR lors d'un processus de sorption.
- Une valeur A_w moyenne, calculée après 24h, de 0.14 kg/m²s^{1/2}.

D'autres caractérisations se concentreront sur l'évaluation de la capacité de tampon hydrique de BTCs et de leur perméabilité à la vapeur d'eau, qui est une propriété matérielle fondamentale ayant des conséquences directes sur la compatibilité hygrothermique des BTCs avec d'autres isolants thermiques biosourcés pour évaluer la perméabilité à grande échelle des assemblages muraux.

REFERENCES

Bruno AW, Gallipoli D, Perlot C, Kallel H. Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls. *Journal of Building Engineering* 2020; 28: 101017, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101017>

Costi de Castrillo M, Ioannou I, Philokyprou M, Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust, *Construction and Building Materials* 2021; 294: 123516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>

Du Y, Habert G, Brumaud C. Influence of tannin and iron ions on the water resistance of clay materials. *Construction and Building Materials* 2022; 323: 126571. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126571>

Eires R, Camões A, Jalali S, Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil, *Journal of Cleaner Production* 2017; 142 (4): 3281-3292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.141>

Fiche technique Bloc BTC Cycle Terre: https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/04/FT_BTC_201108.pdf

Giuffrida G, Caponetto R, Nocera F. Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability* 2019;11:5342. <https://doi.org/10.3390/su11195342>

Giuffrida G, Detommaso M, Nocera F, Caponetto R. Design Optimization Strategies for Solid Rammed Earth Walls in Mediterranean Climates. *Energies* 2021;14:325, <https://doi.org/10.3390/en14020325>

Giuffrida G, Costanzo V, Nocera F, Cuomo M, Caponetto R. Natural and recycled stabilizers for rammed earth material optimization. In: Littlewood J, Howlett RJ, Jain, L.C. (eds) Sustainability in Energy and Buildings 2022. SEB 2022. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 336. Springer, Singapore, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_16

Gomaa M, Jabi W, Soebarto V, Xie YM. Digital manufacturing for earth construction: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 2022;338:130630, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>

Goodhew S, Boutouil M, Streiff F, Le Guern M, Carfrae J, Fox M. Improving the thermal performance of earthen walls to satisfy current building regulations. *Energy and Buildings* 2021: 240/110873 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110873> Guide de conception et de construction. Fabriquer la ville bas carbone avec Cycle Terre, 2021: 01.

Guihéneuf S, Rangeard D, Perrot A, Cusin T, Collet F, Prétot S. Effect of bio-stabilizers on capillary absorption and water vapour transfer into raw earth. *Materials and structures*, 53(6), 138.

Houben H, Guillaud H. *Traité de Construction en Terre*. Éditions Parenthèses 2006 Marseille, France.

NF EN ISO 15148:2003. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of water absorption coefficient by partial immersion.

NF EN ISO 17892-3, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 3 : détermination de la masse volumique des particules solides

NF EN ISO 12751:2021, Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of hygroscopic sorption properties.

NF EN ISO 22007-2, Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method

Schweiker M, Endres E, Gossler J, Hack N, Hildebrand L, Creutz M, Klinge A, Kloft H, Knaack U, Mehnert J, Roswag-Klinge E. Ten questions concerning the potential of digital production and new technologies for contemporary earthen constructions. *Building and Environment* 2021: 206:108240, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108240>

XP P 13 901: 2022, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception