

Comparaison de simulations et de mesures des performances en période estivale de murs anciens rénovés au béton de chanvre

Vincent Proquez^{1*}, Marina Malagoni², Sophie Claude¹, Sandra Gallego³, Stéphane Ginestet¹, Françoise Thellier³

¹ Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse), LMDC (Laboratoire des Matériaux et de la Durabilité des Constructions), 135 Avenue de Rangueil, F- 31077 Toulouse cedex 4

² Instituto Federal de Goiás, Avenida Assis Chateaubriand, n° 1.658, Setor Oeste. 74130-012 - Goiânia, Goiás, Brasil.

³ Université Toulouse III Paul Sabatier, LMDC (Laboratoire des Matériaux et de la Durabilité des Constructions), 135 Avenue de Rangueil, F- 31077 Toulouse cedex 4

*proquez@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ : La simulation des transferts couplés de masse et d'humidité dans la paroi d'un bâtiment ancien en briques situé dans la ville de Cahors, dans le Sud-Ouest de la France, est réalisée en utilisant le logiciel Delphin sur les mois de juin, juillet et août. Deux configurations sont étudiées. La première configuration correspond au cas in situ de la façade isolée par l'intérieur avec du béton de chanvre. La seconde représente une isolation par l'intérieur de la même façade avec un assemblage conventionnel non hygroscopique de polystyrène expansé et de plaque de plâtre. Le faible écart entre les températures de surface intérieure simulées de ces deux configurations montre un faible impact de l'hygroscopicité du béton de chanvre sur la température de surface pour une période estivale dans le cas étudié.

MOTS-CLÉS : Transferts couplés, simulation, béton de chanvre

ABSTRACT: The coupled transfers of heat and moisture in a brick wall of an old building situated in Cahors, South-West of France are numerically simulated using the software Delphin for the months of June, July, and August. Two configurations are studied. The first configuration is the brick wall internally insulated with hemp concrete, corresponding to the existing wall layout. The second configuration is the brick wall internally insulated with a conventional non-hydroscopic combination of expanded polystyrene and gypsum board. The small discrepancies between the simulated inside surface temperatures of the walls show a low incidence of the hemp concrete hygroscopicity on the surface temperature for a summer period.

KEYWORDS: coupled transfers, simulation, hemp concrete.

1. INTRODUCTION

La rénovation énergétique des bâtiments anciens est un enjeu central dans une démarche de réduction des consommations énergétiques. Dans l'optique de préserver au mieux les caractéristiques esthétiques des bâtiments historiques lors de leur rénovation, les choix techniques sont limités. Ainsi, l'isolation par l'extérieur est quasi systématiquement exclue au profit de l'isolation par l'intérieur.

Cette obligation est très contraignante sur le plan hygrothermique, les murs historiques en maçonnerie étant constitués de matériaux sensibles à l'impact de l'humidité (Biseniece *et al.* 2017). Les matériaux biosourcés peuvent offrir des solutions d'isolation adaptées à ces situations grâce à leurs capacités d'échange d'humidité avec l'ambiance (Jerman *et al.* 2019).

Le béton de chanvre est un matériau de construction pouvant être mis en place en façade, en plancher et en toiture typiquement composé de granulats biosourcés issus de la tige du chanvre, de chaux et d'eau.

C'est un matériau poreux à faible impact environnemental (Arrigoni *et al.* 2017), isolant thermique (Dhakal *et al.* 2017), et très bon régulateur d'humidité (Bennai *et al.* 2018).

Il est nécessaire d'étudier les interactions de ces matériaux avec le bâti ancien pour attester de leur potentiel. Un moyen d'étudier cette interaction est de rénover et instrumenter des bâtiments anciens. Un autre, moins coûteux mais présentant encore des écarts significatifs avec les données expérimentales, (Busser *et al.* 2019) est de simuler ces interactions grâce à des logiciels de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux de construction.

Diverses études ont été menées sur les performances annuelles ou estivales de bâtiments isolés au béton de chanvre. Des études *in situ* (Moujalled *et al.* 2018), des simulations à l'échelle du bâtiment (Lidoh *et al.* 2018) ou de la paroi (Maalouf *et al.* 2014), et des études sur les gains énergétiques de rénovations d'un bâtiment historique rénové au béton de chanvre (Agliata *et al.* 2020) ont montré les bonnes performances de ce matériau en situation estivale. Toutefois, la faible effusivité du béton de chanvre par rapport à des matériaux comme le béton peut entraîner des risques de surchauffe (Lidoh *et al.* 2018; Maalouf *et al.* 2014). Bennai *et al.* 2022 montrent que l'impact du caractère hygroscopique du béton de chanvre est plus important en hiver qu'en été.

Dans le cadre de cette étude, une simulation en une dimension des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans une paroi en briques anciennes isolée par l'intérieur avec du béton de chanvre et soumise à des conditions aux limites réelles est réalisée avec le logiciel Delphin 6.1. La simulation est validée par comparaison avec des données obtenues *in situ*. Une autre simulation est effectuée sur la même paroi en briques anciennes mais cette fois isolée par l'intérieur avec des matériaux conventionnels non hygroscopiques (polystyrène expansé et plaque de plâtre) pour une résistance thermique égale à l'isolation au béton de chanvre. La comparaison des températures intérieures de surface des deux simulations montre un très faible écart entre les deux types d'isolation, pointant la faible contribution des effets hygrothermiques dans cette configuration.

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL IN SITU

2.1. DESCRIPTION DE LA FAÇADE ETUDIÉE

Un bâtiment inhabité du 13^{ème} siècle situé à Cahors, dans le Sud-Ouest de la France, a été rénové avec du béton de chanvre et instrumenté dans le cadre d'un projet européen par Claude 2018. Le bâtiment comporte plusieurs typologies de façades mais une seule est étudiée et présentée en Figure 1. Il s'agit d'un mur en brique dans des pans de bois de 14 cm d'épaisseur rénové par l'intérieur avec 15 cm de béton de chanvre banché. La façade étudiée est située au premier étage du bâtiment et orientée vers l'Ouest.



Figure 1 Position de la façade étudiée

La façade étudiée est fortement hétérogène et les matériaux la composant ont subi une forte altération avec le temps, comme noté par Claude 2018.

2.2. INSTRUMENTATION IN SITU

Les températures de surface de la façade étudiée sont relevées à l'aide de thermocouples de type K étalonnés et positionnés sur la surface intérieure et extérieure. Des thermo-hygromètres Honeywell sont disposés dans l'épaisseur du béton de chanvre. Des thermo-hygromètres (Kimo) permettent de mesurer la température et l'humidité relative dans l'ambiance intérieure. Enfin, une station météorologique située sur le toit de la mairie de Cahors, à 260 mètres du bâtiment étudié, permet de relever la température et l'humidité relative extérieure, la quantité de pluie, la vitesse et la direction du vent ainsi que le rayonnement solaire.

3. SIMULATIONS NUMERIQUES

3.1. MODELISATION DES TRANSFERTS COUPLES DANS LES MATERIAUX POREUX

3.1.1. Description du logiciel Delphin

Le logiciel utilisé pour simuler les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans la paroi est le logiciel Delphin. Ce logiciel est développé depuis la thèse de (Nicolai 2007) démarrée en 2004 à l'Université de Technologie de Dresden, et a été validé par le benchmark HAMSTAD. Ce logiciel permet le calcul des transferts couplés de chaleur, d'humidité, de sels et de polluants dans les matériaux de construction en une, deux et trois dimensions. Dans cette étude, la simulation est effectuée en une dimension.

3.1.2. Equation de transfert de masse

L'équation (1) régit les transferts de masse dans le cas où il n'y a pas de flux convectif d'air dans le matériau poreux (Nicolai et Grunewald 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v+i}} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[-K_l(w) * \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l * g \right] - \frac{D_{v,air}(T)}{\mu * R_v * T} * f(\theta_g) * \frac{\partial p_v}{\partial x} \right] + \sigma_{REV}^{m_{w+v+i}} \quad (1)$$

avec $\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v+i}}$ [kg.m⁻³] l'évolution temporelle de la masse d'eau liquide, sous forme de vapeur et de glace dans le volume élémentaire représentatif, $K_l(w)$ [s] la conductivité liquide du matériau dépendant de la teneur en eau, p_l [Pa] la pression liquide, ρ_l [kg.m⁻³] la densité de la phase liquide et g [m.s⁻²] l'accélération gravitationnelle, $D_{v,air}(T)$ [W.m⁻²] la diffusivité de la vapeur dans l'air selon l'équation de Schimmer, μ [-] perméabilité à la vapeur d'eau, R_v [J.kg⁻¹.K⁻¹] la constante de la vapeur d'eau, $f(\theta_g)$ [-] la fonction de volume de la phase gazeuse, p_v [Pa] la pression de vapeur partielle dans la phase gazeuse et $\sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$ [kg.m⁻³] la source d'eau dans le volume de référence.

3.1.3. Equation de transfert d'énergie

L'équation (2) régit les transferts d'énergie dans le cas où il n'y a pas de flux convectif d'air dans le matériau poreux (Nicolai et Grunewald 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = -\frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda(w, T) \frac{\partial T}{\partial x} + u_l * \left[-K_l(w) * \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l * g \right] \right] + h_v * \left[-\frac{D_{v,air}(T)}{\mu * R_v * T} * f(\theta_g) * \frac{\partial p_v}{\partial x} \right] \right] \quad (2)$$

avec $\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U$ [W.m⁻³] décrivant l'évolution temporelle de la quantité d'énergie dans le volume élémentaire représentatif, soit la somme de l'énergie dans la phase solide, liquide et gazeuse, $\lambda(w, T)$

$[W.m^{-1}.K^{-1}]$ la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau et de la température, $T [K]$ la température, $u_l [J.kg^{-1}]$ l'énergie interne spécifique de la phase liquide, $h_v [J.kg^{-1}]$ l'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau.

3.2. SAISIE DES CARACTERISTIQUES MATERIAUX

Le logiciel Delphin dispose d'une base de données de matériaux caractérisés utilisables pour les simulations mais permet également à l'utilisateur de saisir des matériaux à partir de leurs caractéristiques hygrothermiques (Vogelsang *et al.* 2013).

Les données des matériaux sont saisies à partir de la caractérisation effectuée par Claude 2018 sur des briques du 16^{ème} siècle fournies par la ville de Cahors et le béton de chanvre utilisé pour la rénovation du bâtiment. Ces caractéristiques sont consignées dans le Tableau 1.

Indice utilisé dans le logiciel	Paramètre	Unité	Béton de chanvre	Brique 16 ^{ème} siècle
ρ	Masse volumique sèche	$kg.m^{-3}$	440	1616
c_p	Capacité thermique sèche	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	752	800
Θ_{por}	Porosité ouverte	$m^3.m^{-3}$	0,789	0,388
Θ_{eff}	Teneur en eau à saturation	$m^3.m^{-3}$	0,788	0,388
Θ_{cap}	Teneur en eau capillaire	$m^3.m^{-3}$	0,305	0,275
λ_{dry}	Conductivité thermique sèche (plaque chaude gardée)	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,078	0,39
A_w	Coefficient d'absorption capillaire	$kg.m^{-2}.s^{-1/2}$	0,196	0,277
μ	Perméabilité à la vapeur d'eau	-	5,5	-

Tableau 1 Caractéristiques hygrothermiques des matériaux saisies dans Delphin

La courbe de sorption du béton de chanvre a également été évaluée expérimentalement par méthode gravimétrique par Claude 2018. Afin d'obtenir une courbe de sorption sur toute l'étendue de l'humidité relative, la courbe de sorption expérimentale composée de quatre points sert à paramétrer un modèle de courbe de sorption GAB selon la méthode exposée par Labat *et al.* 2016. Les matériaux utilisés pour la simulation avec une rénovation conventionnelle sont issus de la base de données du logiciel Delphin.

3.3. CONFIGURATIONS TESTEES

Deux types de configuration sont testées comme détaillé sur la Figure 2. La première configuration représente la configuration *in situ*, avec le mur en briques de 14 cm d'épaisseur rénové par 15 cm de béton de chanvre banché. La seconde configuration représente ce même mur en briques de 14 cm d'épaisseur rénové avec un système conventionnel de 6,7 cm de polystyrène expansé et 1,3 cm de plaque de plâtre. L'épaisseur de polystyrène a été déterminée de manière à obtenir une résistance thermique équivalente entre les deux configurations.

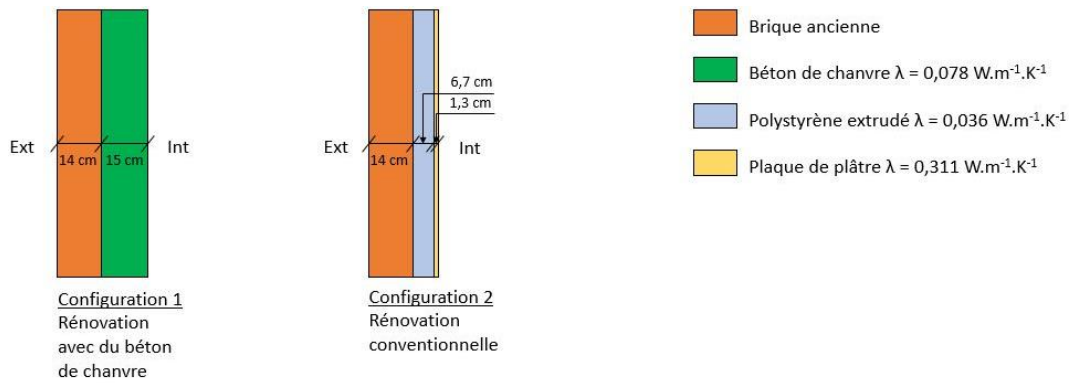


Figure 2 Composition des deux configurations testées

3.4. CONDITIONS AUX LIMITES

3.4.1. Données climatiques et intérieures

Les conditions météorologiques mesurées par la station située sur le toit de la mairie de Cahors servent à créer un fichier de données météorologiques implémenté dans le logiciel Delphin. L'humidité relative et la température dans l'ambiance intérieure sont saisies à partir des données mesurées par les thermo-hygromètres situés dans la pièce correspondant à la façade étudiée. Toutes ces données sont des moyennes horaires de mesures relevées toutes les 10 minutes.

Afin de prendre en compte l'effet des masques des bâtiments environnant la paroi étudiée, le rayonnement solaire incident à cette paroi est évalué grâce à une simulation sur le logiciel Energyplus, avec comme données d'entrées les conditions météorologiques dont le rayonnement solaire global ainsi que la morphologie urbaine de l'ilot de bâtiments dans lequel se trouve la paroi étudiée.

3.4.2. Typologie

Les conditions aux limites sur le flux de chaleur et de vapeur sont définies par une condition de Cauchy, avec les coefficients d'échanges superficiels tels que prescrits par AFNOR 2008. Les conditions aux limites sur le rayonnement solaire incident sont définies avec une condition de Neumann, c'est-à-dire qu'un flux est imposé à la limite de l'élément. La pluie battante est calculée directement selon le modèle implémenté dans le logiciel Delphin (Nicolai et Grunewald 2006).

4. RESULTATS ET ANALYSES

4.1. COMPARAISON ENTRE LES VALEURS SIMULEES ET MESUREES POUR LA PAROI RENOVEE AU BETON DE CHANVRE

La simulation a été réalisée du 16 juin à 20h au 1^{er} septembre à minuit, soit sur une durée de 1830 heures. La température de surface intérieure ainsi obtenue est comparée avec la température de surface mesurée sur la paroi. Deux mesures de la température de surface intérieure de la paroi ont été réalisées au moyen de thermocouples, l'une au centre de la surface, l'autre à proximité d'un mur de refend. La comparaison de ces températures expérimentales et simulées, présentée sur la Figure 3, permet d'attester de la fiabilité de la simulation.

Huerto-Cardenas *et al.* 2020 proposent une méthodologie pour attester de la fiabilité d'une simulation hygrothermique dans les bâtiments historiques. En utilisant conjointement l'erreur absolue moyenne et le coefficient de Pearson, il est possible d'évaluer d'une part l'écart entre les valeurs mesurées et

simulées et d'autre part la corrélation entre ces séries de valeurs. Si l'erreur moyenne absolue en température est inférieure à 1°C et le coefficient de Pearson supérieur à 0,5, alors la simulation peut être considérée comme d'un niveau élevé de précision pour la variable considérée.

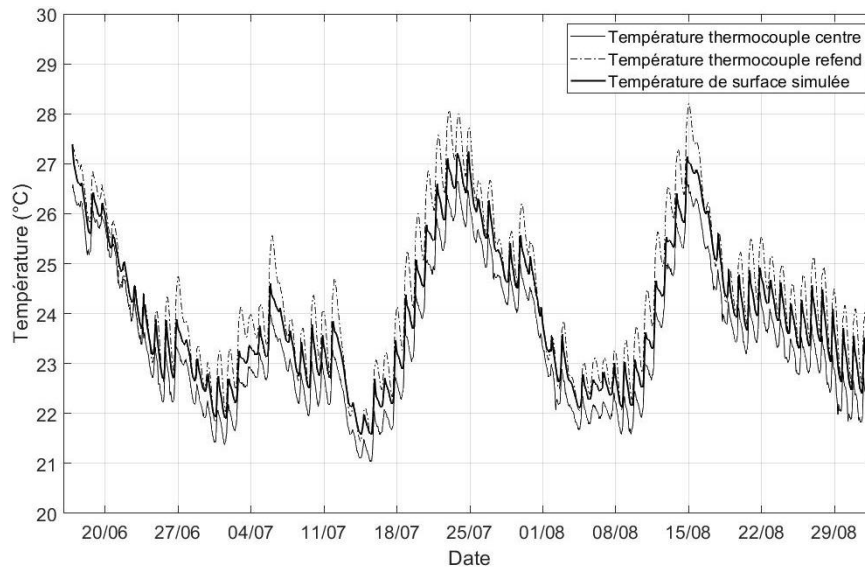


Figure 3 Comparaison des températures de surfaces intérieures mesurées et simulées

Comme le montrent les valeurs consignées dans le Tableau 2, ces critères sont vérifiés. La qualité de la simulation de la température de surface est donc satisfaisante, le modèle peut donc être considéré comme validé. Ce résultat est en adéquation avec le constat de Busser *et al.* 2019, qui relève une meilleure concordance entre les données simulées et mesurées aux surfaces des parois plutôt que dans leur épaisseur.

Série de valeurs	Coefficient de Pearson avec les données simulées Objectif >0,5	Erreur absolue moyenne avec les données simulées Objectif <1°C
Thermocouple centre	0,99	0,53
Thermocouple refend	0,98	0,43

Tableau 2 Indices d'évaluation de la qualité de la température de surface simulée

4.2. COMPARAISON DES TEMPERATURES DE SURFACE SIMULEES POUR LES DEUX CONFIGURATIONS

Les différences entre températures de surfaces intérieures simulées pour la configuration rénovée au béton de chanvre et la configuration rénovée avec des matériaux conventionnels sont très faibles, comme visible sur la Figure 4, où un détail de la période du 19 au 29 juillet est également présenté. L'écart absolu moyen entre ces deux séries de températures est de 0,05°C et l'écart maximal de 0,21 °C. La modification de composition de la paroi ne semble pas impacter sensiblement la température de surface. Ce faible écart indique une faible influence des transferts d'humidité sur les températures de surface en période estivale, que ce soit pour une rénovation au béton de chanvre ou avec des matériaux conventionnels. On peut penser qu'une production d'humidité intérieure pourrait départager les comportements des deux configurations de parois étudiées.

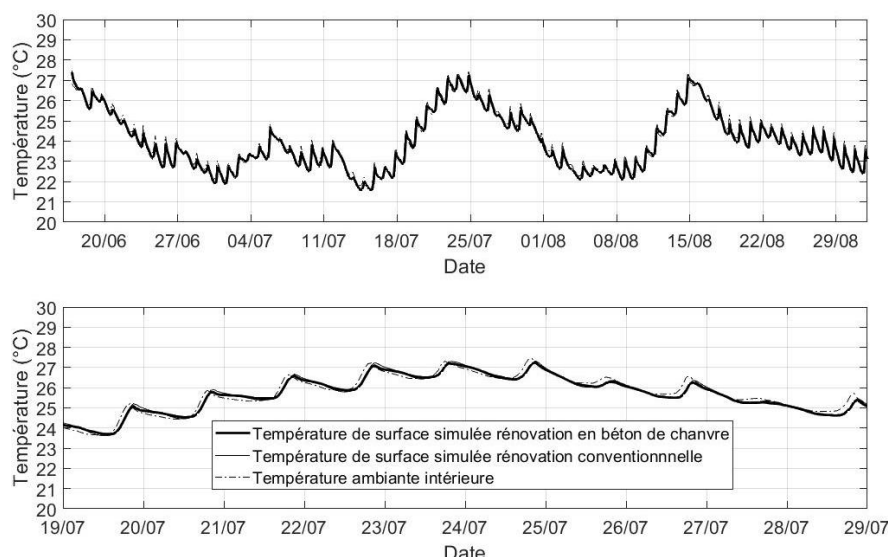


Figure 4 Comparaison des températures de surface simulées et de la température intérieure ambiante

5. CONCLUSION

Deux simulations représentant deux configurations de rénovation d'un mur ancien en briques ont été réalisées à partir de données climatiques réelles et de caractérisation des matériaux en laboratoire. La comparaison des températures de surface obtenues par mesure *in situ* et numériquement pour la première configuration permet de valider la simulation. La comparaison des températures de surface simulées pour les deux configurations montre un faible écart, explicable par de faibles charges d'humidité dans l'ambiance intérieure, mais pouvant également mettre en avant une faible influence des transferts d'humidité sur la température de surface en situation estivale. La réitération de ce travail avec un apport d'humidité en intérieur au moyen d'un humidificateur pourrait permettre de mieux départager les deux configurations.

6. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2008. « NF EN 15026 Performance Hygrothermique des Composants et Parois de Bâtiments - Evaluation du Transfert d'humidité par Simulation Numérique ».
- Agliata, Rosa, Alfonso Marino, Luigi Mollo, et Paolo Pariso. 2020. « Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster-A Case Study ». *Sustainability* 12 (11): 4620. <https://doi.org/10.3390/su12114620>.
- Arrigoni, Alessandro, Renato Pelosato, Paco Melià, Gianluca Ruggieri, Sergio Sabbadini, et Giovanni Dotelli. 2017. « Life Cycle assessment of Natural Building Materials: the Role of Carbonation, Mixture Components and Transport in the Environmental Impacts of Hempcrete Blocks ». *Journal of Cleaner Production* 149: 1051-61. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>.
- Bennai, F., M.Y. Ferroukhi, Ferhat Benmahiddine, Rafik Belarbi, et A. Nouviaire. 2022. « Assessment of Hygrothermal Performance of Hemp Concrete Compared to Conventional Building Materials at Overall Building Scale ». *Construction and Building Materials* 316 (janvier): 126007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126007>
- Bennai, F., N. Issaadi, K. Abahri, R. Belarbi, et A. Tahakourt. 2018. « Experimental Characterization of Thermal and Hygric Properties of Hemp Concrete with Consideration of the Material Age Evolution ». *Heat and*

- Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung* 54 (4): 1189-97. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2221-2>.
- Biseniece, Edīte, Gatis Žogla, Agris Kamenders, Reinis Purviņš, Kristaps Kašs, Ruta Vanaga, et Andra Blumberga. 2017. « Thermal Performance of Internally Insulated Historic Brick Building in Cold Climate: A Long Term Case Study ». *Energy and Buildings* 152 (octobre): 577-86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.082>.
- Busser, Thomas, Julien Berger, Amandine Piot, Mickael Pailha, et Monika Woloszyn. 2019. « Comparison of Model Numerical Predictions of Heat and Moisture Transfer in Porous Media with Experimental Observations at Material and Wall Scales: An Analysis of Recent Trends ». *Drying Technology* 37 (11): 1363-95. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1502195>.
- Claude, Sophie. 2018. « Étude Expérimentale et Numérique de Solutions Basées sur les Eco-Matériaux pour la Rénovation Thermique du Patrimoine Bâti Urbain ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse., <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01884760>.
- Dhakal, Ujwal, Umberto Berardi, Mark Gorgolewski, et Russell Richman. 2017. « Hygrothermal Performance of Hempcrete for Ontario (Canada) Buildings ». *Journal of Cleaner Production* 142 (janvier): 3655-64. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>.
- Huerto-Cardenas, H.E., F. Leonforte, N. Aste, C. Del Pero, G. Evola, V. Costanzo, et E. Lucchi. 2020. « Validation of Dynamic Hygrothermal Simulation Models for Historical Buildings: State of the Art, Research Challenges and Recommendations ». *Building and Environment* 180 (août): 107081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>.
- Jerman, Miloš, Irene Palomar, Václav Kočí, et Robert Černý. 2019. « Thermal and Hygric Properties of Biomaterials Suitable for Interior Thermal Insulation Systems in Historical and Traditional Buildings ». *Building and Environment* 154 (March): 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.020>.
- Labat, Matthieu, Camille Magniont, Nicolaas Oudhof, et Jean-Emmanuel Aubert. 2016. « From the Experimental Characterization of the Hygrothermal Properties of Straw-Clay Mixtures to the Numerical Assessment of Their Buffering Potential ». *Building and Environment* 97 (février): 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>.
- Lidoh, Houda, Badr Ikken, et Samir Idrissi Kaitouni. 2018. « Thermal Performance of a Hemp Concrete Residential Building Envelope in Tangier-Morocco ». In *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-8. Rabat, Morocco: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702896>.
- Maalouf, C., A.D. Tran Le, S.B. Umurigirwa, M. Lachi, et O. Douzane. 2014. « Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France ». *Energy and Buildings* 77 (juillet): 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>.
- Moujalled, Bassam, Yacine Aït Ouméziane, Sophie Moissette, Marjorie Bart, Christophe Lanos, et Driss Samri. 2018. « Experimental and Numerical Evaluation of the Hygrothermal Performance of a Hemp Lime Concrete Building: A Long Term Case Study ». *Building and Environment* 136 (mai): 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.025>.
- Nicolai, Andreas. 2007. « Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials ». Thèse de doctorat, Université de Syracuse., <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.2016.2088>.
- Nicolai, Andreas, et John Grunewald. 2006. « Delphin 5 Reference Manual ».
- Vogelsang, Stefan, Heiko Fechner, et Andreas Nicolai. 2013. « Delphin 6 Material File Specification, Version 6.0 ».