
Modélisation hygrothermique d'une paroi avec une isolation extérieure en utilisant un matériau à base de paille céréalière

Marouen Slaimia¹, Naima Belayachi¹, Dashnor Hoxha¹

¹ Université d'Orléans, INSA-CVL, PRISME, EA 4229, 8 Rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans cedex 2, France

marouen.slaimia@etu.univ-orleans.fr ; naima.belayachi@univ-orleans.fr ; dashnor.hoxha@univ-orleans.fr ;

RÉSUMÉ. Le principal objectif de cette étude est la modélisation du comportement hydrothermique d'une paroi composée d'un support en parpaing et d'un isolant en béton à base de paille céréalière. La paroi est réalisée en vue d'une réhabilitation par extérieure à partir de blocs de béton paille préfabriquée. L'étude in-situ est réalisée à l'échelle d'un bâtiment démonstrateur avec une ossature bois et un remplissage en parpaings. Pour des raisons de comparaison d'efficacité d'isolation, chaque façade est composée de quatre parties, trois isolants différents et une partie témoin sans isolation. Des capteurs de température/humidité et de flux thermique sont installés à l'intérieur, l'extérieur et à l'interface parpaing-isolant respectivement. Ces mesures en fonction du temps serviront d'une part à comparer l'efficacité des thermiques les différents isolants, et d'autre part pour la validation et les conditions aux limites des prédictions de l'étude numérique du code de calcul WUFI. La confrontation des mesures in-situ et de modélisation numérique montre la capacité du modèle de couplage hydrothermique à prédire le transfert de chaleur et de vapeur au sein d'une paroi multicouche.

ABSTRACT. The main objective of this study is the modelling of hydrothermal behaviour of a multilayer wall composed with concrete blocks and insulation biocomposite based on cereal straw. The wall is made with manufactured straw-concrete blocks. The experimental study is performed at wall and building scale with wood frame, and concrete blocks. For comparison reasons of insulation efficiency of insulation materials, each wall is composed of four parts, three different insulation material and a control part without insulation. Temperature/humidity and heat flow sensors are placed inside, outside and at the interface concrete blocks-straw insulation concrete respectively. These measures over time will firstly to compare the thermal efficiency of the different insulation biocomposite, and also for the validation and boundary conditions of the predictions of the numerical study using WUFI code. The comparison of experimental measurements and numerical predictions shows the capacity of the transfert model to predict the hydrothermal behaviour of multilayer wall.

MOTS-CLÉS : paille, hygrothermique, isolation, bio-composite, chaux, modélisation, gypse

KEY WORDS: Straw, hydrothermal behaviour, biocomposite, lime, modelling, gypsum

1. Introduction

Les composites à base de fibres végétales sont largement utilisés dans différentes applications industrielles suite à un intérêt grandissant à diminuer la consommation d'énergie et l'impact environnemental. L'essentiel des travaux concernent le renforcement des matrices afin d'augmenter leurs performances mécaniques dans la plupart du temps utilisées pour un rôle structural comme les bétons fibrés haute performance. Dans le domaine du bâtiment, un secteur connu par sa consommation d'énergie importante et les émissions de GES, l'utilisation des bio-composites est au cœur des actions proposées par la communauté scientifique et d'ingénierie même si l'idée d'utiliser des fibres végétales dans la fabrication de blocs de terre est la première tentative de fabriquer des matrices renforcées. L'intérêt est de proposer des matériaux avec des performances nouvelles respectant les conditions d'utilisation, la réglementation sanitaire et technique mais aussi les conditions de durabilité. Plusieurs études pour différentes fibres, matrices, selon des applications diverses ont proposé des matériaux de ce type [NIS 03] [SAM 05] [MIL 14].

A l'instar du béton de chanvre, un matériau baptisé Béton-paille a été proposé dans le cadre d'un projet financé par la région centre PROMETHE, destiné à la réhabilitation thermique par extérieur des bâtiments pour répondre au besoin de rénovation énergétique important en France. Le matériau à base de paille céréalière a montré des propriétés thermique et mécanique intéressantes [BEL 13]. L'utilisation de la paille céréalière a été motivée par son faible coût et son abondance dans la région Centre qui est première région productrice de céréales en Europe. L'étude a commencé à l'échelle de la paille [BOU 14] pour la sélection et le choix de la meilleure fibre, ensuite à l'échelle du matériau et la procédure de sa fabrication ainsi que ses propriétés thermomécaniques au laboratoire [BEL 13]. Enfin, sa durabilité qui est un élément important a fait également l'objet d'une investigation expérimentale au laboratoire via des essais de vieillissement accéléré [BEL 15].

L'étape essentielle qui justifierait son industrialisation est son comportement hydrothermique à l'échelle de la paroi d'un bâtiment avec des conditions climatiques réelles d'utilisation. De nombreuses études expérimentales et numériques ont été réalisées pour prendre en compte le transfert thermique et le comportement hygroscopique des matériaux [Del 10], [KAL 03], [RAF 12]. Pour la plupart des études numériques, le modèle de Kunzel a été utilisé [KUN 96] [KUN 05] pour sa capacité à simuler le couplage des transferts de chaleur et masse (eau et/ou air). Même si les résultats sont généralement en bonne concordance avec les mesures expérimentales, il y a encore des difficultés à modéliser le comportement fortement hygroscopique comme les matériaux à base de fibres végétales. D'un autre côté les mesures expérimentales qui alimentent souvent ces études numériques sont issues de simulation au laboratoire d'une paroi exposée à une variation de conditions de température et d'humidité au sein d'une enceinte climatique [KAL 03] [RAF 12]. Dans le cadre du projet PROMETHE, un démonstrateur a été construit à l'échelle du bâtiment en utilisant le matériau en blocs sur un support de parpaings pour avoir les mêmes conditions d'une réhabilitation de bâtiments classiques. Sur les quatre façades du démonstrateur, la paroi a été décomposée en quatre parties contenant trois formulations de béton à base de fibres végétales différentes pour des raisons de comparaison avec un mur sans isolation afin de montrer l'efficacité du matériau proposé. Le comportement des matériaux est suivi par un ensemble de capteurs (température, humidité) installés à l'intérieur, et à l'extérieur de chaque mur, et des capteurs de flux thermiques mis en place à l'interface isolant-parpaings.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de modéliser le comportement hydrothermique d'une paroi avec une isolation extérieure en utilisant un matériau à base de paille céréalière en utilisant comme données d'entrée les paramètres mesurés au laboratoire et les mesures in-situ comme conditions aux limites pour la modélisation hydrothermique qui seront dans ce cas-là des conditions réelles d'usage d'un bâtiment. Cette étude numérique a été réalisée en utilisant le logiciel WUFI basé sur le couplage hydrothermique Kunzel [KUN 96] [KUN 05]. Une comparaison entre les résultats numériques et les résultats in situ de flux thermique permettra de valider le potentiel thermo-hydrrique du nouveau matériau ainsi que sa capacité à isoler un bâtiment de manière efficace tout en étant économique et durable.

2. Comportement hygrothermique d'une paroi multicouche

La modélisation numérique a été réalisée en utilisant une description macroscopique des transferts thermiques et hydriques à l'aide des équations du modèle de couplage de Kunzel.

2.1 Modèle géométrique et conditions aux limites

Afin de montrer la performance thermique de l'isolant à base de paille céréalière, la modélisation hygrothermique a été réalisée en utilisant une paroi avec isolation par extérieur à l'échelle d'un bâtiment démonstrateur (Figure 1). Les conditions aux limites intérieures et extérieures sont des conditions réelles de température et d'humidité mesurées in-situ sur le bâtiment démonstrateur (Figure 1). En effet, un des objectifs du

Projet PROMETHE a été de proposer un procédé de fabrication en blocs de béton paille avec une mise en place à l'échelle d'un bâtiment qui servira à montrer la performance thermique de l'isolant sous les conditions climatiques réelles.

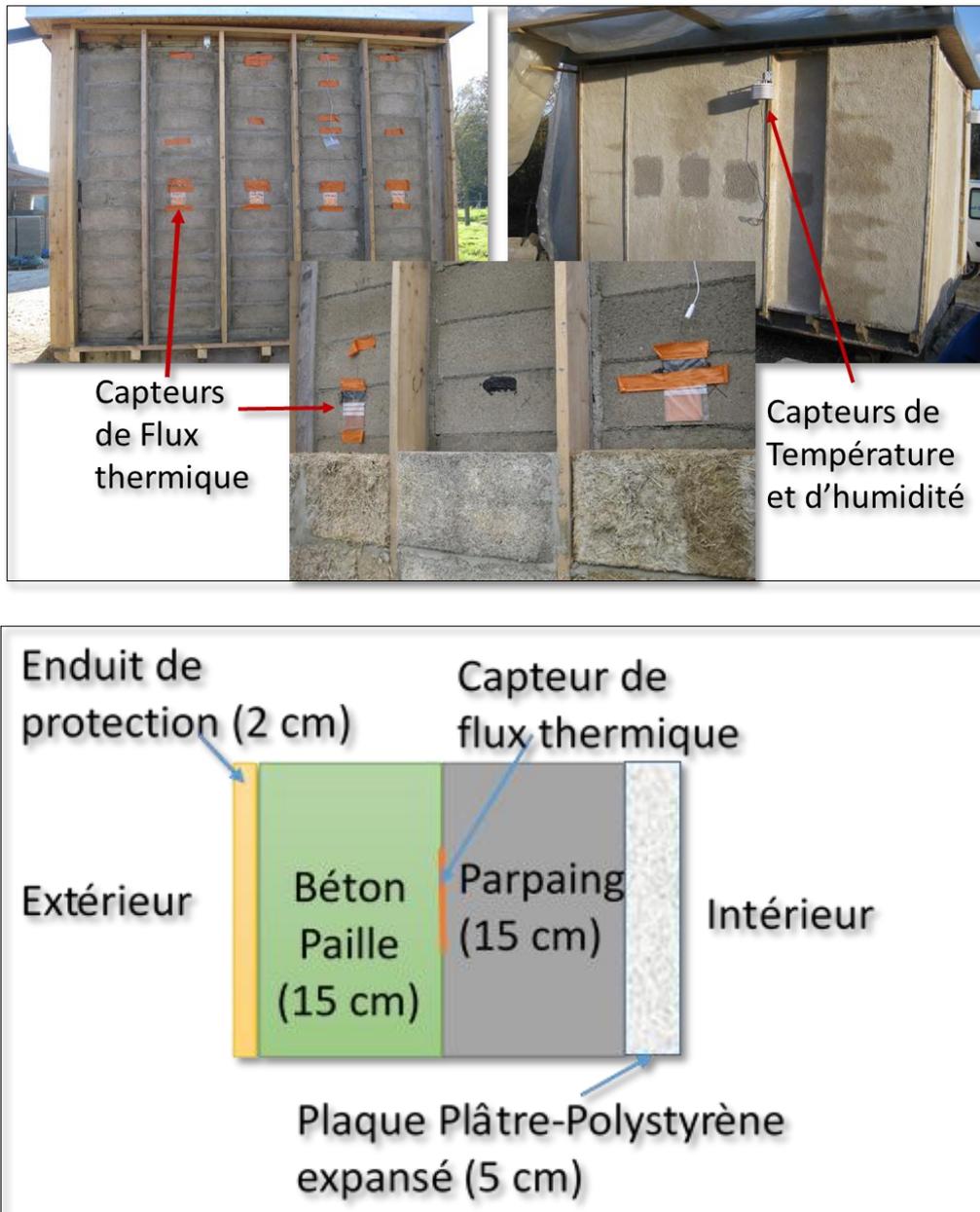


Figure 1. Démonstrateur avec une façade type composée de 4 portions instrumentées avec des capteurs pour les mesures *in-situ* (en haut), Schéma de la coupe de la paroi utilisée dans la modélisation hydro-thermique (en bas).

Le démonstrateur est localisé à Blois sur l'aire de séchage de l'entreprise Construire-Eco (à 100 Km d'Orléans) de façon à examiner l'effet de l'orientation (nord, sud, est, ouest) sur le transfert de chaleur dans la paroi. Sur chaque façade, le mur est divisé à l'aide d'une ossature bois en quatre parties destinées chacune pour un isolant différent : béton paille-chaux, béton paille-plâtre, le béton de chanvre de construire-Eco et un enduit traditionnel sans isolant extérieur pour des raisons de comparaison (Figure 1). La conception du bâtiment a été réalisée pour une configuration d'une réhabilitation thermique réelle par extérieure avec des murs en parpaings et une isolation

intérieure en plaque de polystyrène expansé. En effet la majorité des bâtiments du parc existant sont construits en parpaings. Le démonstrateur d'une hauteur de 2,5 m, 3,4 m de largeur et de 4,4 m de longueur a été réalisé avec une toiture et une étanchéité EPDM.

Le bâtiment démonstrateur a été instrumenté avec des capteurs de température et d'humidité, et des capteurs de flux entre le parpaing et l'isolant ou l'enduit extérieur pour mesurer le flux de chaleur sortant et entrant. Le modèle géométrique utilisé pour les calculs éléments finis représente une coupe transversale des matériaux sans prise en compte des joints de mortier pour le parpaing et pour les blocs des différents isolants pour des raisons de simplicité.

L'épaisseur du mur est de 22 cm dans le cas sans isolant, et 37 cm dans le cas avec isolant (Figure 1). La Figure 2 montre le maillage et les conditions aux limites intérieures et extérieures.

Le mode constructif non ventilé adopté dans le démonstrateur et l'absence d'isolation dans une portion de chaque façade peuvent produire des variations thermiques très importantes ce qui influe sur la représentativité des conditions d'une maison standard. Cependant, pour éviter ce problème, une pompe à chaleur a été installée dans le bâtiment pour simuler un milieu intérieur et contrôler une température de 18 °C.

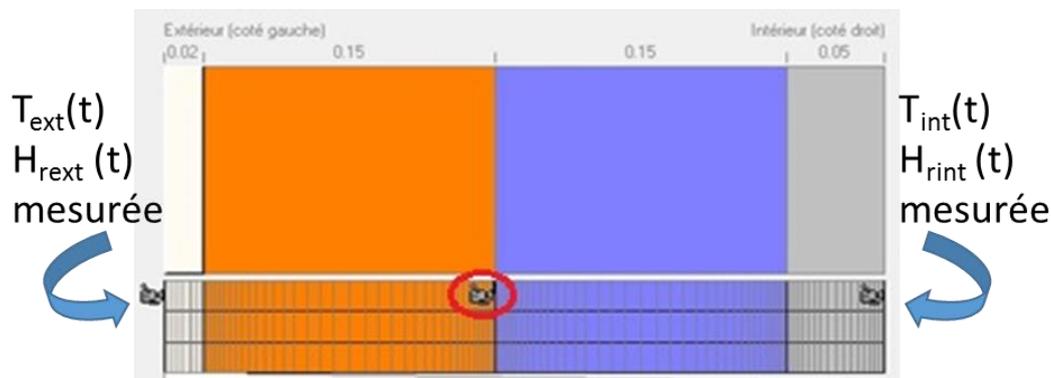


Figure 2. Maillage des couches de la paroi avec les points de contrôle Choisis.

2.2 Modèle et équations de transfert hygrothermique

La modélisation du comportement hygrothermique de cette investigation a été réalisée en utilisant le code de calcul numérique WUFI (version PRO 5.3) [ZIR 07].

Bien qu'il existe plusieurs logiciels pour le couplage des transferts de chaleur et d'humidité, Wufi est souvent utilisé pour l'évaluation et la prédiction du comportement hydrothermique dans les parois des bâtiments. Kalamees et al. [KAL 03] par exemple ont réalisé une étude expérimentale et numérique du comportement hydrothermique des parois en bois. Ils ont mis en évidence l'utilité et l'efficacité de ce logiciel pour montrer la performance des ossatures bois. Dans une autre étude menée par Delgado et al. [DEL 10] sur des cas de transfert hygrothermique unidimensionnel et couplé, les auteurs ont utilisé quatorze logiciels de modélisation hygrothermique dont WUFI. La comparaison des prédictions de la variation de la température des différents logiciels a révélé que les résultats de WUFI sont les plus précis pour la modélisation du refroidissement nocturne. Antretter et al. [ANT 11] à leur tour ont fourni une validation de la performance du modèle de WUFI pour la modélisation du transfert hygrothermique en utilisant les normes existantes.

Les équations gouvernant le modèle de transfert hydrique et thermique sont données dans les équations [1] et [2], suivantes :

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla_p \cdot (\delta_p \nabla(\phi \cdot P_{sat})) \quad [1]$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi \cdot P_{sat})) \quad [2]$$

avec H , T , w et ϕ sont respectivement l'enthalpie, température, teneur en eau et l'humidité relative. P_{sat} , λ , H_v , δ_p et D_ϕ sont respectivement la pression de vapeur saturante, la conductivité thermique, l'enthalpie d'évaporation de l'eau, le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau et le coefficient de transfert liquide.

Les paramètres d'entrée pour la modélisation sont :

- Les propriétés physiques des matériaux et l'épaisseur de chaque couche
- L'orientation et l'inclinaison de la paroi
- Le climat extérieur et intérieur (Température et humidité...)
- La période de calcul.

Le tableau 1 regroupe le jeu de paramètres utilisé pour chaque matériau utilisé dans les calculs numériques.

Matériau	Conductivité thermique (W/mK)	Chaleur spécifique (J/kgK)	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur (-)
Enduit à base de chaux	0.1	500	7
Béton à base de paille	0.07	550	7
Parpaing + polystyrène	0.2	550	14

Tableau 1. Les paramètres des matériaux utilisés dans les calculs thermo-hydriques de la paroi.

3. Résultats et discussions

3.1. Effet du type d'isolant sur le comportement thermique de la paroi

La Figure 3 présente l'évolution de la variation du flux thermique dans les différentes parties de la façade nord du démonstrateur en fonction du temps mesurée pour une période estivale entre Juin et Août 2014. La présence d'un isolant influence de manière significative le flux de chaleur dans la paroi. Cette évolution reste importante dans la partie du mur sans isolant allant de 15 à -20 W/m² pour la plupart des mesures comparée au flux dans les parties avec isolants qui sont entre 6 et 7 W/m². La comparaison de ces fluctuations montre l'efficacité des différents isolants mis en place sur les parois du bâtiment.

Cependant, si on compare que le flux mesuré pour les trois isolants (Figure 4), on peut voir que le matériau à base de paille céréalière montre des valeurs plus faible que le béton-chanvre et donc une excellente performance thermique avec un flux sortant deux fois plus petit.

La comparaison entre les deux variétés de béton paille montre le potentiel thermique du matériau à base de plâtre par rapport au matériau à base de chaux.

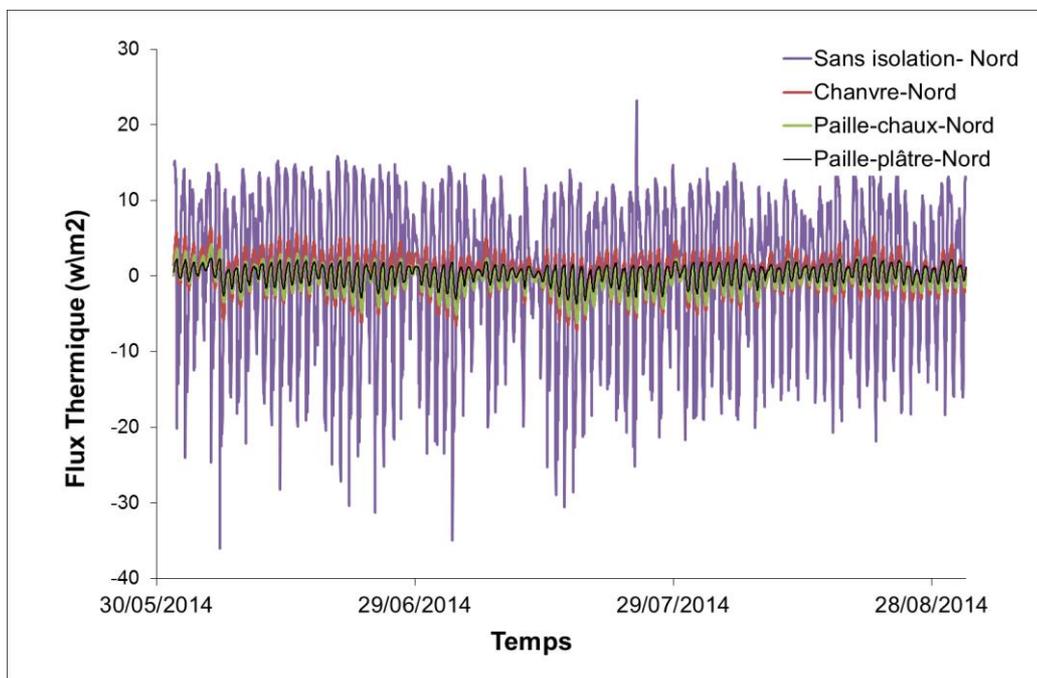


Figure 3. L'évolution temporelle de flux thermique in-situ des différentes portions de la façade Nord de démonstrateur.

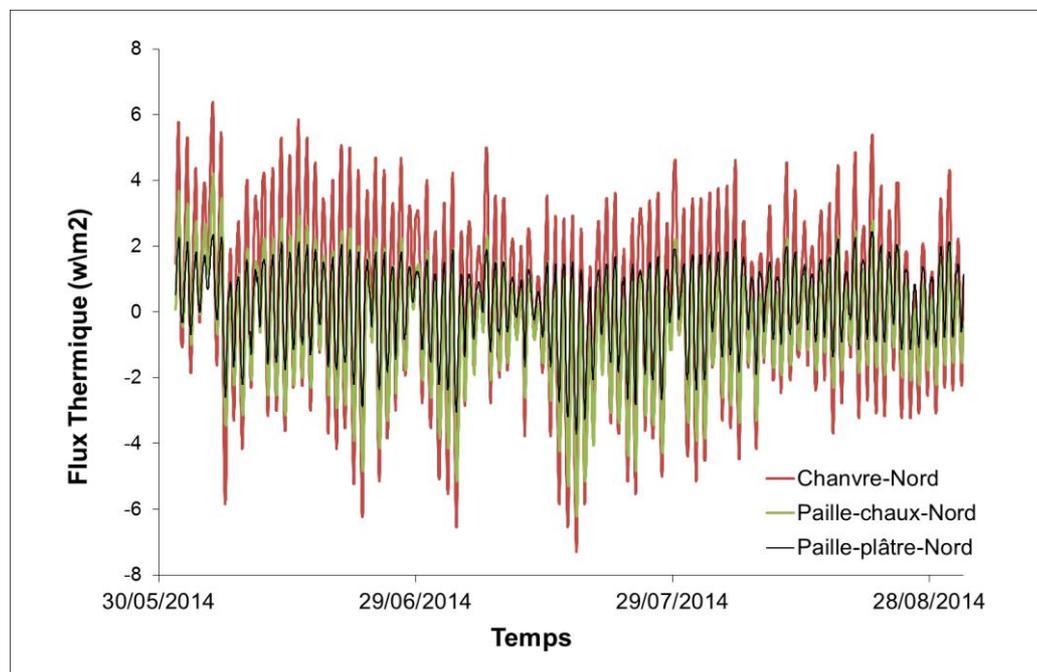


Figure 4. L'évolution temporelle de flux thermique in-situ des différentes Formules de béton à base de fibre végétale de la façade Nord de démonstrateur.

3.2. Validation du comportement hygrothermique de la paroi multicouche

Sur la Figure 5 sont comparés les résultats du flux thermique mesuré avec ceux du flux thermique calculé à partir de la simulation hydrothermique du mur en utilisant un isolant en paille-plâtre. Une bonne concordance des résultats est obtenue pour une grande partie des fluctuations sauf pour quelques ponts de flux négatif. Ce résultat permet de mettre en évidence la capacité du modèle hydrothermique à prédire le comportement des parois. Cette

différence peut s'expliquer par une résistance supplémentaire présente in-situ, et qui n'est pas prise en compte dans la simulation numérique. On pourra penser à une lame d'air entre les différentes couches composant la paroi, et surtout entre l'isolant et le parpaing là où le capteur de flux a été placé. Cette différence peut être également justifiée par la non prise en compte de la radiation solaire dans les conditions aux limites à l'extérieur. Une réflexion pour ajouter ce paramètre peut être plus efficace pour les résultats de la simulation numérique.

Cette bonne concordance des résultats valide aussi les coefficients d'échange convectif qui sont pris en compte en comparant les simulations aux mesures in-situ.

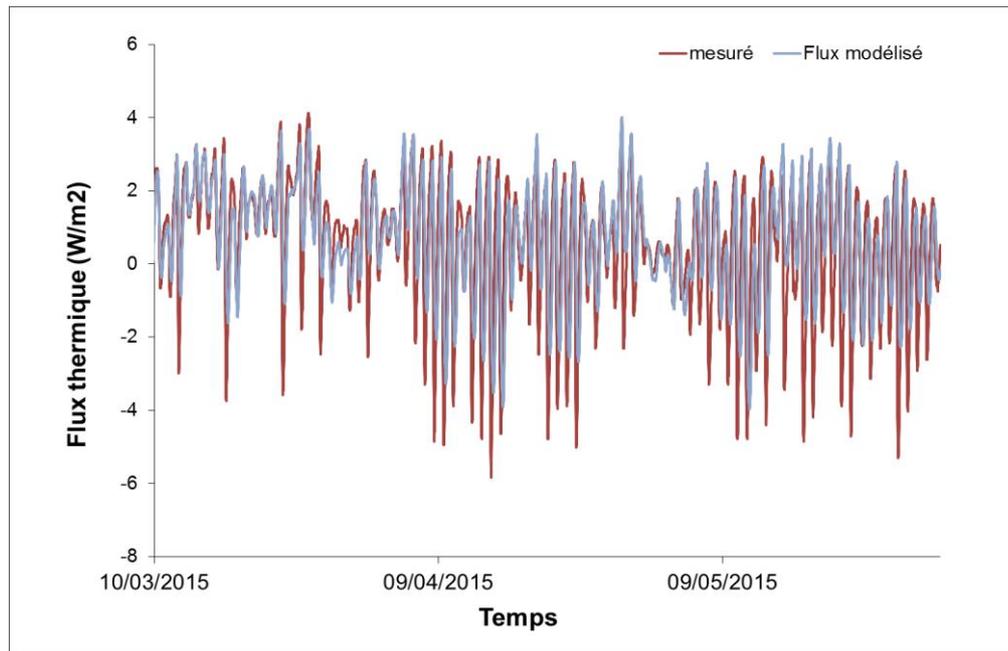


Figure 5. L'évolution temporelle de flux thermique expérimental et numérique de la portion béton paille à base de plâtre de la façade Est de démonstrateur.

4. Conclusion

Le démonstrateur mis en place dans le cadre du projet PROMETHE a été utilisé pour acquérir l'évolution de la température, de l'humidité et du flux de chaleur dans des parois multicouches en vue d'une réhabilitation thermique des bâtiments. La comparaison des résultats in-situ du flux de chaleur montre l'efficacité de l'isolation par l'extérieur pour les trois isolants utilisés à savoir le béton plâtre-paille, chaux paille, et chaux chanvre par rapport à la paroi sans isolation. La confrontation de ces résultats montre également que le meilleur isolant est le béton paille-plâtre par rapport au béton chanvre. L'étude numérique a été réalisée en utilisant les paramètres identifiés expérimentalement au laboratoire pour les trois isolants, les paramètres de la littérature du parpaing et du polystyrène expansé posé à l'intérieur, et les conditions aux limites en température et en humidité mesurées in-situ. Les prédictions du modèle hydrothermique de Kunzel sont relativement proches des résultats in-situ pour la période estivale utilisée sauf pour des pics de flux sortant. Cette bonne concordance a mis en évidence la capacité du modèle de couplage de transfert à prédire le comportement hydrothermique des parois multicouches. La continuité immédiate de ces prédictions est d'examiner le problème de condensation dans la paroi, ou à l'interface support isolant.

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région Centre pour le soutien financier du programme de recherche du projet PROMETHE.

6. Bibliographie

- [ANT 11] Antretter F, Sauer F, Schöpfer T, Holm A. « Validation of a hygrothermal whole building simulation software », in *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia*, vol. 14, 2011, 16.
- [BEL 13] N. Belayachi, M. Bouasker, D. Hoxha, M. Al-Mukhtar, 2013, « Thermo-Mechanical Behaviour of an Innovant Straw Lime Composite for Thermal Insulation Applications », *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 390, pp. 542-546, 2013.
- [BEL 15] N. Belayachi, D. Hoxha, M. Slaimia, « Durability studies on lightweight plaster and straw fiber based material for building thermal insulation ». *ICBBM 2015*: 203-207.
- [BOU 14] Bouasker, M.; Belayachi, N.; Hoxha, D.; Al-Mukhtar, M. « Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications ». *Materials* 2014, 7, 3034-3048.
- [DEL 10] Delgado JMPQ, Ramos NMM, Barreira E, de Freitas VP. « A CRITICAL REVIEW OF HYGROTHERMAL MODELS USED IN POROUS BUILDING MATERIALS », *Journal of Porous Media* 13, n° 3 (2010): 221-34.
- [KAL 03] Kalamees T, Vinha J. « Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures », *Building and Environment* 38, n° 5 (mai 2003): 689-97.
- [KUN 96] KÜNZEL HM, KIESSL K. « Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components ». *Int J Heat Mass Transf.* oct 1996;40(1):159-67
- [KUN 05] Künzel HM, Holm A, Zirkelbach D, Karagiozis AN. « Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope ». *Sol Energy.* avr 2005;78(4):554-61
- [MIL 14] Millogo, Y.; Morel, J.-C.; Aubert, J.-E.; Ghavami, K. « Experimental analysis of pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers », *Constr. Build. Mater.* 2014, 52, 71–78.
- [NIS 03] Nishino, T.; Hirao, K.; Kotera, M.; Nakamae, K.; Inagaki, H. « Kenaf reinforced biodegradable composite ». *Compos. Sci. Technol.* 2003, 63, 1281–1286.
- [RAF 12] H. Rafidiarison, R. Rémond, A. Nicolas, E. Mougel, « Etude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique des matériaux hygroscopiques » XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [SAM 05] Sampaio, S.; Bishop, D.; Shen, J. « Physical and chemical properties of flax fibres from stand-retted crops desiccated at different stages of maturity », *Industrial Crops and Products*, Volume 21, Issue 3, May 2005, Pages 275-284
- [ZIR 07] Zirkelbach D, Schmidt T, Kehrer M, Künzel HM. WUFI® Pro 5 Manual [Internet]. Online; 2007. Disponible sur: https://wufi.de/download/WUFI-Pro-5_Manual.pdf