

# Suivi in situ du comportement hygrothermique d'un édifice patrimonial

## In situ monitoring of the hygrothermal behaviour of a heritage building

Yacine AIT OUMEZIANE<sup>1\*</sup>, Jean Philippe COSTES<sup>2</sup>, Fatima EL MANKIBI<sup>1</sup>, Valérie LEPILLER<sup>1</sup>, Sylvie BEGOT<sup>1</sup>, Philippe DESEVAUX<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comte, CNRS  
2, avenue Jean Moulin, 90000 Belfort, France

<sup>2</sup>GRF Ressources, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Clermont-Ferrand  
85, Rue du Dr Bousquet, 63100 Clermont-Ferrand, France

\*(auteur correspondant : [yacine.ait\\_oumeziane@univ-fcomte.fr](mailto:yacine.ait_oumeziane@univ-fcomte.fr))

**Résumé** – Ce travail s'inscrit dans le cadre du suivi et de l'évaluation des performances hygrothermiques de différentes solutions de rénovation d'un bâtiment patrimonial. L'édifice a été instrumenté à l'aide de thermocouples et d'hygromètres situés dans les parois et dans les ambiances. L'analyse des données de mesure collectées permet de mieux appréhender l'impact de la réhabilitation sur le comportement de l'enveloppe et sur le confort ressenti par les occupants. Cette analyse est complétée à partir de simulations numériques basées sur les transferts d'humidité et de chaleur.

**Mots-clés** : Suivi in situ ; comportement hygrothermique ; transfert d'humidité et de chaleur ; confort ; patrimoine

**Abstract** – This work deals with the monitoring of the hygrothermal performance of different insulation solutions of a heritage building. The building is monitored with thermocouples and humidity sensors located in the walls, indoor and outdoor. The collected data improve the analysis of the impact of insulation works on the hygrothermal behaviour of the envelope and on the comfort felt by the occupants. This analysis is completed with numerical simulations based on heat and moisture transfer.

**Keywords**: In situ monitoring; hygrothermal behaviour; heat and moisture transfer; comfort; heritage

### Nomenclature

$c$  chaleur spécifique massique,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$   
 $D_l$  coefficient de conduction liquide,  $kg.m^{-1}.s^{-1}$   
 $D_v$  coefficient de diffusion de vapeur d'eau,  $m^2.s^{-1}$   
 $l_v$  chaleur latente de vaporisation à  $T_{ref}$ ,  $J.kg^{-1}$   
 $n$  porosité totale  
 $p_{sat}$  pression de vapeur saturante, Pa  
 $S$  surface,  $m^2$   
 $T$  température, K  
 $T_{ref}$  température de référence, (296,15 K)  
 $t$  temps, s

### *Symboles grecs*

$\lambda$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$   
 $\varphi$  humidité relative, %  
 $\mu$  facteur de résistance à la diffusion de vapeur  
 $\xi_\varphi$  capacité hygrique,  $kg.m^{-3}$   
 $\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$

### *Indices et exposants*

0 relatif au matériau sec  
\* équivalent  
l eau liquide  
p paroi  
v vapeur d'eau

## 1. Introduction

La réglementation actuelle peut parfois apparaître inadaptée à la reconversion des bâtiments patrimoniaux en raison d'un manque de connaissance de leurs comportements. Les travaux de

réhabilitation énergétique peuvent ainsi provoquer des désordres et des pathologies non prévus. Confort hygrothermique, qualité d'air intérieur dégradée par une étanchéité du bâtiment augmentée sans renouvellement d'air adapté, durabilité des matériaux fragilisée et d'autant plus soumise au phénomène de gel/dégel et à ses conséquences, sont autant de points de vigilance encore mal identifiés.

Le travail présenté concerne le suivi et l'évaluation des performances hygrothermiques consécutifs à la réhabilitation de bâtiments conventuels de l'abbaye de Cluny situés en Saône-et-Loire en région Bourgogne Franche-Comté. Classés au titre des Monuments Historiques, ces bâtiments accueillent actuellement l'un des campus de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers (ENSAM). Le secteur d'étude concerne plus précisément la résidence des élèves ingénieur de l'ENSAM Cluny. Différentes solutions techniques de doublage isolant d'origine bio-sourcée, minérale, ou polymère et de parement ont ainsi été mises en œuvre sur la paroi en contact avec l'extérieur. Les parois ont été instrumentées à l'aide de thermohygromètres.

L'analyse expérimentale des données de mesure collectées au sein des murs et des ambiances permet de mieux appréhender l'impact de la réhabilitation sur le comportement de l'enveloppe et sur le confort ressenti. Cette analyse est complétée et discutée à partir de simulations numériques basées sur les transferts d'humidité et de chaleur en milieu poreux. Elle est conduite avec les limites de connaissance des propriétés des matériaux en place, difficiles d'appréhender en l'état. Le travail proposé vise ainsi à questionner les choix d'instrumentation, les procédures réglementaires de rénovation et les modèles numériques.

## 2. Méthode

La partie de bâtiment concernée par cette étude est l'aile ouest du cloître, au premier étage. Elle abrite la résidence des élèves ingénieurs de l'ENSAM. Les chambres, orientées à l'est, donnent sur la cour intérieure du cloître. Les figures 1 et 2 montrent respectivement une vue d'ensemble du site ainsi qu'une photographie de l'aile ouest du cloître.



Figure 1 : Site de l'abbaye de Cluny, vue d'ensemble



Figure 2 : Photographie de l'aile ouest du cloître où se trouvent les chambres rénovées au 1<sup>er</sup> étage

Dix chambres similaires en terme de configuration, de dimensions, d'orientation et d'occupation, ont été sélectionnées. Les chambres ont une surface au sol d'environ 19 m<sup>2</sup> surmontée d'une mezzanine d'environ 13 m<sup>2</sup>. Cette configuration est permise par une importante hauteur sous plafond d'environ 4,7 m. Ces chambres permettent ainsi d'accueillir 4 personnes. Les murs extérieurs sont composés de 70 cm de pierre calcaire. Chaque chambre possède une grande fenêtre double vantail simple vitrage. Les derniers travaux de rénovation datant du début des années 1980 ont révélé la présence d'un enduit cimentaire d'environ 2 cm qui n'a alors pas été éliminé.

En raison du caractère architectural et patrimonial de l'édifice, l'isolation par l'intérieur a été privilégiée. Au total, 10 solutions différentes de rénovation ont été mises en œuvre. Elles sont la combinaison d'un type d'isolant, d'une technique de pose, d'une préparation ou non du mur d'origine et de la présence ou non d'un pare-vapeur ou frein-vapeur. Dans ce papier, seules 5 chambres sont étudiées. Le tableau 1 présente ainsi ces 5 différentes solutions retenues. L'épaisseur d'isolant est commune à chaque configuration et est de 12 cm d'épaisseur.

chambre	isolant	conditionnement	pose	ossature	film	parement	préparation
C1	-		-	-	-	enduit chaux	élimination de l'enduit par piquage
C2	laine de verre	panneaux semi-rigides	plaquage	métallique	pare vapeur	BA 13	-
C3	fibre de bois	panneaux semi-rigides	plaquage	bois	frein-vapeur	fermacell	-
C4	fibre de bois	panneaux semi-rigides	plaquage	bois	-	fermacell	-
C5	fibre de bois	panneaux semi-rigides	plaquage	bois	-	fermacell	élimination de l'enduit par piquage

Tableau 1 : Descriptif des solutions mises en œuvre

La chambre n°1, n'ayant subi qu'une pose d'enduit chaux après élimination de l'enduit d'origine, constitue le cas de référence. Le doublage en laine de verre du mur extérieur de la chambre n°2, simple à mettre en œuvre et économique, constitue la solution la plus classique et la plus répandue. Enfin, les chambres n°3 à 5 ont été rénovées à partir de panneaux semi-rigides en fibre de bois. Les trois solutions de rénovation de ces chambres ont été testées pour définir l'intérêt du frein-vapeur, ainsi que l'intérêt d'éliminer totalement l'enduit d'origine du mur ancien dans le but d'évaluer leur influence du point de vue de la régulation de l'humidité intérieure. Des travaux ont également été menés au niveau des ouvrants. Le simple vitrage existant a été conservé afin de préserver l'esthétique extérieure du bâtiment classé. Un double vitrage additionnel a cependant été installé au droit de l'isolation intérieure.

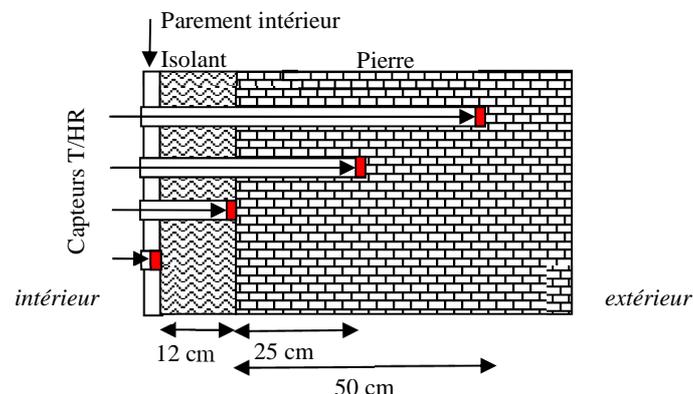


Figure 3 : Positionnement des capteurs à l'intérieur de la paroi

Chaque chambre est instrumentée afin de suivre l'évolution de la température et de l'humidité relative au sein des parois et dans les ambiances, intérieure et extérieure. Les capteurs utilisés sont des Sensirion SHT75 de précision  $\pm 1,8\%$  sur l'humidité relative et  $\pm$

0,3°C sur la température à 25°C. Ils ont été placés à 3 hauteurs différentes (0,8 m ; 2,7 m et 3,7 m) à mi-distance entre cloison séparative et ouvrant. A chaque hauteur, deux capteurs ont été positionnés respectivement à 50 cm et 25 cm de la surface intérieure du mur d'origine et un capteur a été installé à chaque interface : isolant/mur et isolant/parement intérieur. La figure 3 illustre le positionnement des capteurs à l'intérieur des murs. D'autre part, un capteur a été placé dans le sas situé entre le vitrage d'origine et le double vitrage additionnel.

### 3. Théorie

#### 3.1. Modélisation des transferts humidité / chaleur au travers des parois

Le modèle utilisé est un modèle monodimensionnel multicouches basé sur la conservation des équations d'air, d'humidité et chaleur. Il s'appuie sur la modélisation mathématique de Künzle [1]. Simplifié dans cette étude, le système complet d'équations est présenté en détail dans la référence [2].

$$\xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla [D_v \nabla (\varphi p_{\text{sat}})] + \nabla [D_1^{\varphi} \nabla \varphi] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [\rho_0 c^*] \frac{\partial T}{\partial t} + c_1 (T - T_{\text{ref}}) \xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \\ = \nabla [\lambda \nabla T + (l_v + c_v (T - T_{\text{ref}})) [D_v \nabla (\varphi p_{\text{sat}})]] + \nabla [c_1 (T - T_{\text{ref}}) [D_1 \nabla \varphi]] \end{aligned} \quad (2)$$

Le contact à l'interface de chaque couche de matériaux est considéré comme parfait. Les conditions aux limites retenues sont des conditions de Robin. Dans ce travail, le vent, le rayonnement solaire courtes et grandes longueurs d'onde ainsi que la pluie ne sont pas pris en compte. Les coefficients d'échanges thermiques superficiels sont déterminés à partir d'un jeu de corrélations usuelles sous l'hypothèse d'une plaque plane verticale isotherme soumise à la convection naturelle [2]. Les coefficients d'échange d'humidité sont déduits des coefficients d'échange thermique à partir de la relation de Lewis [3]. Le système d'équations différentielles instationnaires fortement couplées obtenu est implémenté sous Matlab par une méthode des différences finies. Les travaux présentés dans [2] présentent en détails le formalisme mathématique utilisé. Le modèle a été validé dans [2] par confrontation avec les modèles numériques issus d'un benchmark international HAMSTAD WP2 [4]. Les propriétés hygrothermiques de la pierre constitutive de l'enveloppe extérieure du bâtiment demeurent inconnues. Les données fournies par les fabricants n'offrent qu'une estimation partielle des propriétés hygrothermiques des matériaux. Ainsi, les propriétés hygrothermiques des différents matériaux sont issues de la base de données du logiciel WUFI [5].

#### 3.2. Méthode d'analyse du confort

L'analyse de confort adoptée s'appuie sur les données de la norme NF EN 15251 [6]. Compte-tenu des caractéristiques du bâtiment étudié, le bâtiment d'étude peut être classé en catégorie III, catégorie qui concerne les bâtiments existants au niveau de confort modéré. En période hivernale, la limite basse d'inconfort est située à 18°C et la limite supérieure à 25°C. Ces limites sont définies pour la température opérative dont une expression simplifiée est présentée dans l'équation (3) :

$$T_{op} = \frac{T_a + \frac{\sum_i S_i T_{p,i}}{\sum_i S_i}}{2} \quad (3)$$

où  $T_a$  [°C] désigne la température de l'ambiance intérieure,  $T_p$  [°C] la température de paroi et  $S$  [m<sup>2</sup>] sa surface correspondante. Les températures et humidités relatives dans les chambres sont relativement proches (cf. figures 5 et 6). Ainsi, les gradients entre chambres, moteurs des

transferts, demeurent relativement faibles. Il est donc admis que les échanges hygrothermiques entre les chambres sont négligés.

En outre, la norme spécifie de conserver une humidité relative comprise entre 20% et 70% et de ne pas dépasser une teneur en eau de l'air de  $12 \text{ g.kg}^{-1}$  afin d'éviter les problèmes relatifs à un air trop sec ou trop humide.

#### 4. Résultats expérimentaux

L'évolution de la température et de l'humidité relative dans les parois et les ambiances a été mesurée pendant une année, de janvier à décembre, avec un pas de temps d'acquisition de dix minutes. Cependant, seuls les résultats du mois de janvier sont présentés dans ce papier. Les données climatiques extérieures sont présentées figure 4. Elles correspondent à la moyenne des températures et humidités extérieures mesurées en façade extérieure au niveau des chambres situées le plus au nord (chambres 1, 3, 4 et 5). En effet, durant le mois de janvier, ces sondes extérieures ne sont pas perturbées par le rayonnement solaire contrairement à la chambre n°2. Les températures et humidités relatives des ambiances des chambres étudiées sont présentées respectivement figure 5 et figure 6. Ces dernières mettent notamment en évidence les périodes d'occupation (du 2 janvier au 14 janvier et du 22 janvier au 31 janvier) et d'inoccupation. A occupation identique, certaines différences sont observées concernant l'évolution de la température intérieure de chaque chambre, les occupants ayant notamment la possibilité de réguler la température d'émission par le biais d'une vanne thermostatique située sur chaque radiateur.

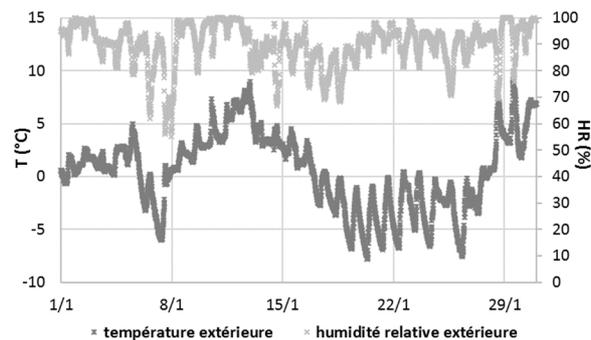


Figure 4 : Evolution de la température et de l'humidité relative extérieures

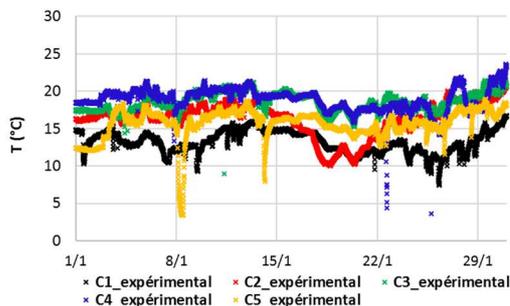


Figure 5 : Evolution de la température intérieure par chambre

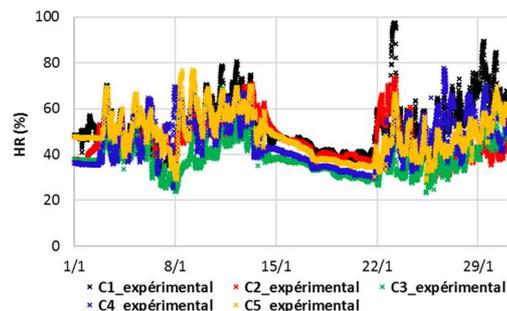


Figure 6 : Evolution de l'humidité relative intérieure par chambre

Les figures 7 à 12 représentent respectivement les évolutions de température et d'humidité relative dans la pierre à 50 cm et 25 cm de sa surface interne et à l'interface pierre isolant.

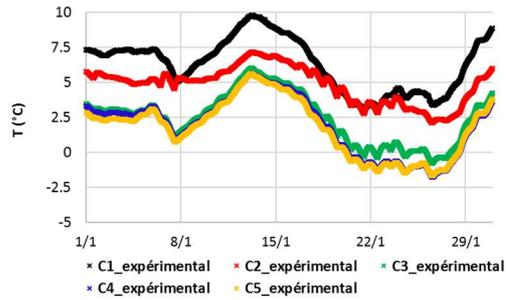


Figure 7 : Evolution de la température dans la pierre à 50 cm de sa surface interne

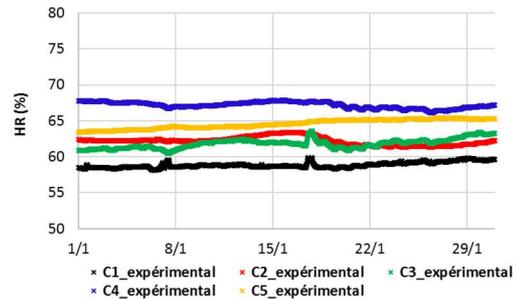


Figure 8 : Evolution de l'humidité relative dans la pierre à 50 cm de sa surface interne

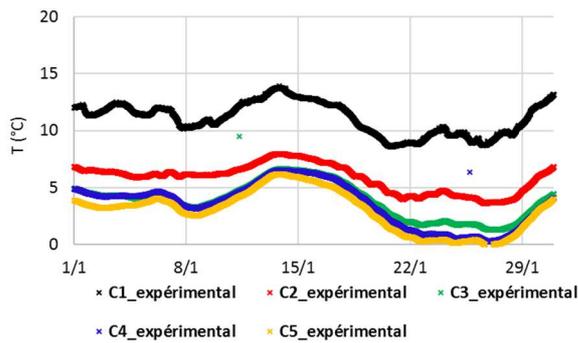


Figure 9 : Evolution de la température dans la pierre à 25 cm de sa surface interne

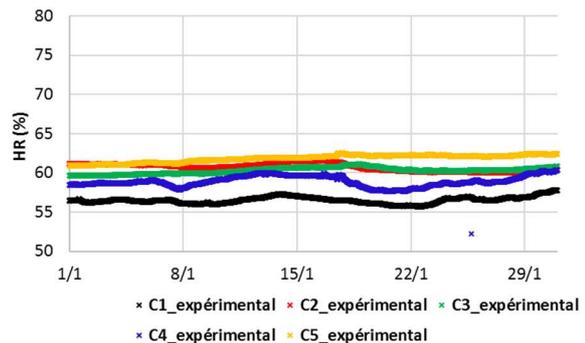


Figure 10 : Evolution de l'humidité relative dans la pierre à 25 cm de sa surface interne

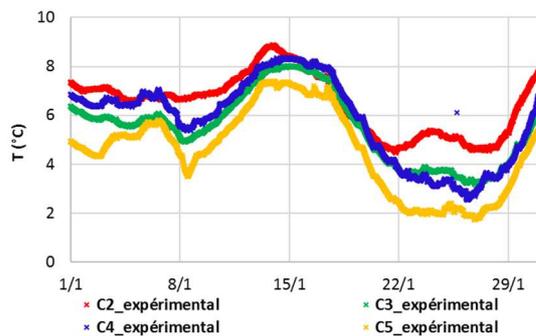


Figure 11 : Evolution de la température à l'interface pierre / isolant

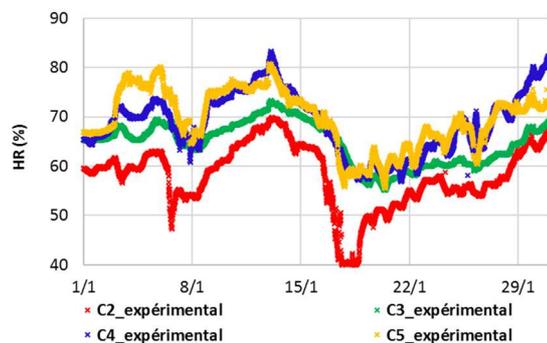


Figure 12 : Evolution de l'humidité relative à l'interface pierre / isolant

Mis à part la chambre 2 située la plus au sud qui bénéficie d'ensoleillement, les chambres 1, 3, 4 et 5, ne reçoivent aucun ensoleillement durant le mois de janvier et la présence d'un doublage isolant intérieur entraîne ainsi une nette chute des températures au sein de la paroi d'origine en pierre. Cette observation soulève la question d'une potentielle fragilisation de la paroi rénovée face au risque de gel / dégel.

Les évolutions relativement proches des températures au sein des parois rénovées en fibre de bois montrent une faible influence de la technique de mise en œuvre. Il demeure difficile de comparer les solutions fibre de bois à la solution laine de verre de la chambre 2 en raison de son exposition. Toutefois, comme le montre la figure 11, l'influence de l'isolant et du parement intérieur ne semble pas prépondérante.

Les figures 8 et 10 montrent une très faible évolution de l'humidité relative au sein de la paroi d'origine, quelle que soit la configuration de la chambre. Ceci démontre le caractère peu perspirant et hygroscopique de la pierre. Enfin, contrairement aux chambres 4 et 5, la présence

d'un frein-vapeur apposé au panneaux en fibre de bois au sein de la chambre 3 permet de limiter l'humidité relative au sein de la fibre de bois (figure 12). Il a été choisi de ne pas représenter dans ce papier les évolutions de température et d'humidité relative à l'interface isolant / parement. Si le parement utilisé n'a que très peu d'influence sur l'évolution des températures, il permet d'obtenir un certain amortissement des charges d'humidité relative intérieure.

Les données psychrométriques mesurées dans les chambres 2 et 3 sont représentées respectivement figures 13 et 14. Sur ces figures, le polygone vert représente la zone de confort définie au sens de la norme NF EN 15251.

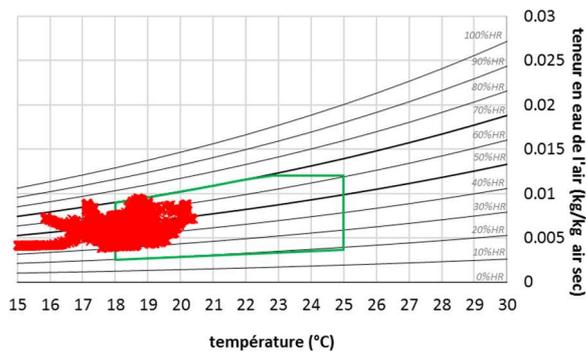


Figure 13 : Données psychrométriques de la chambre 2

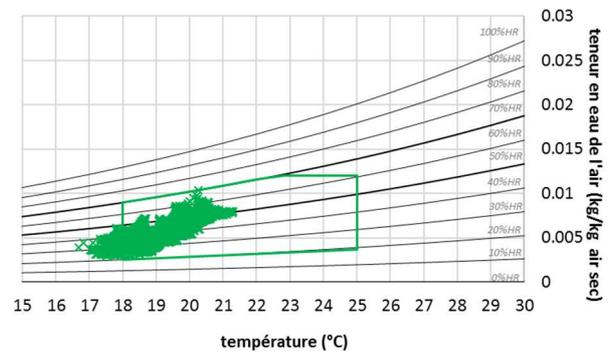


Figure 14 : Données psychrométriques de la chambre 3

En période d'occupation, on observe 32% de temps d'inconfort dans la chambre 2 doublée en laine de verre. A l'inverse, dans les chambres rénovées en fibres, on descend à 6% de temps d'inconfort dans la chambre 3 et 15% dans la chambre 4. La chambre 5 possède un taux d'inconfort plus élevé autour 55% en raison notamment d'une température de vitrage nettement plus faible que celle des autres chambres. Il est à noter que la forte chute de température observée dans la chambre 2 (figure 5) n'a pas d'impact sur le taux d'inconfort car elle est située hors période d'occupation.

## 5. Discussion : confrontation des résultats expérimentaux et numériques

L'objectif de ce paragraphe est de comparer les résultats expérimentaux collectés in situ aux résultats numériques.

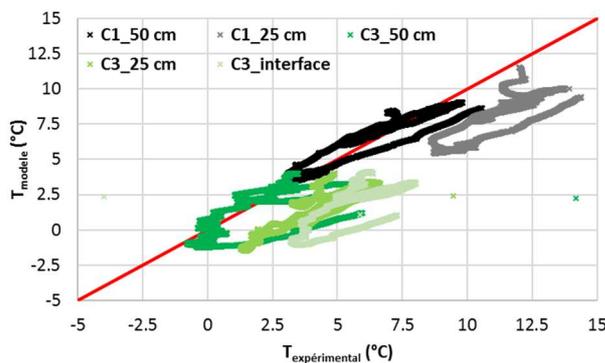


Figure 15 : Comparaison des températures mesurées et simulées

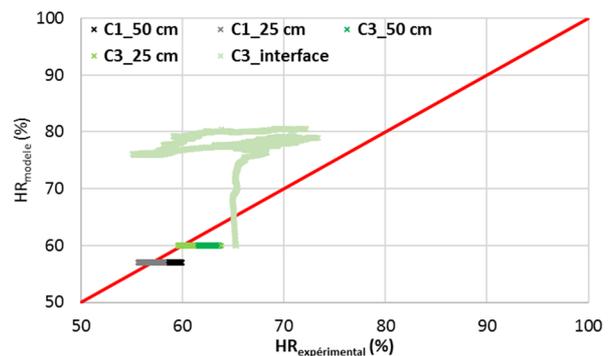


Figure 16 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées

Les températures et humidités relatives simulées sont représentées en fonction des températures et humidités relatives mesurées, respectivement figure 15 et figure 16. Une assez faible corrélation est observée ce qui témoigne d'un besoin de caractérisation plus précise du

comportement hygrothermique des matériaux et d'une meilleure évaluation des échanges superficiels.

## 6. Conclusion

Ce travail montre qu'il est difficile de tirer des conclusions formelles sur le comportement hygrothermique in situ d'un bâtiment soumis à des sollicitations climatiques et sur la notion de confort ressenti par les occupants. En effet, la difficulté provient à la fois de la complexité de l'objet d'étude et du manque de maîtrise des paramètres expérimentaux.

Toutefois, les résultats de l'étude menée confirment que la présence d'un doublage intérieur isolant, quel qu'il soit, conduit à une nette chute des températures dans le matériau d'origine ce qui le rend davantage vulnérable aux risques de gel / dégel. En outre, les solutions bio sourcées, notamment à base de fibres de bois, apparaissent comme une alternative sérieuse aux solutions plus classiques en laine de verre. Elles offrent une bonne régulation de l'humidité ambiante et permettent un amortissement des variations de températures extérieures analogues à la paroi doublée en laine de verre. Elles semblent par ailleurs permettre un meilleur confort hygrothermique que l'on peut attribuer à leur plus forte effusivité. La présence d'un frein-vapeur sur la face intérieure des panneaux en fibres de bois semble réduire l'humidité au sein des panneaux assurant de meilleures performances d'isolation thermique et de durabilité.

Numériquement, les caractéristiques des matériaux implémentées sont issues d'une bibliothèque et conduisent à d'importants écarts entre températures et humidités relatives mesurées et simulées. Un travail de caractérisation hygrothermique plus avancé reste donc à mener. Le recours aux techniques d'optimisation adaptées à la résolution du problème inverse peut être un outil de choix pour représenter plus fidèlement le comportement hygrothermique réel des bâtiments existants et ainsi proposer des solutions de rénovation plus efficaces.

## Références

- [1] H.M. Künzle, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*, Fraunhofer IBP, 1995.
- [2] Y. Aït Oumeziane, *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*, Thèse de doctorat de l'INSA Rennes, 2013.
- [3] W.K. Lewis, *The Evaporation of Liquid into a Gas*, *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1849: 325–340 (1922).
- [4] C.E. Hagetoft et al. *Assessment Method for Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases*, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27 (4): 327–352 (2004).
- [5] WUFI Light, Vers. 6.3, Fraunhofer IBP., Germany, 2019.
- [6] NF EN 15251, *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments*, 2007.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Région Bourgogne-Franche-Comté pour son soutien dans le cadre des projets CORDOBA2 et CHOB, à la Direction de l'ENSAM et leur partenaire AM Valor et enfin aux personnels techniques impliqués dans le projet.