

Influence des transferts d'humidité sur la transmittance thermique de murs en ossature bois

Machhour EL ASSAAD¹, Yohan PLANTEC^{1,2}, Thibaut LECOMPTE¹, Thibaut COLINART^{1*}

¹Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

² Cellaouate, 29600 Saint Martin des Champs, France

*(auteur correspondant : thibaut.colinart@univ-ubs.fr)

Résumé - Cette étude explore la manière dont le transfert d'humidité affecte le coefficient de transmission thermique (valeur U) des murs à ossature bois à l'aide de méthodes expérimentales et numériques. Six systèmes de murs avec différents matériaux d'isolation et couches de finition ont été analysés. Les résultats montrent que le flux d'humidité augmente la valeur U lorsqu'il est aligné sur le flux de chaleur, avec des effets plus importants dans les systèmes très perméables. L'étude met également en évidence les limites de la méthode du flux thermique (HFM), qui mesure de manière imprécise les valeurs U en bloquant le flux d'humidité.

Abstract - This research explores how moisture transfer affects the thermal transmittance (U-value) of timber frame walls using experimental and numerical methods. Six wall systems with different insulation materials and finishing layers were analyzed. Results show that moisture flow increases the U-value when aligned with the heat flux, with more significant effects in highly permeable systems. The study also highlights the limitations of the Heat Flow Meter (HFM) method, which inaccurately measures U-values by blocking moisture flow.

Nomenclature

T température, K
 U transmittance thermique, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
Symboles grecs
 φ flux thermique, W.m^{-2}

Indices et exposants
exp expérimental
se/si surface extérieure/intérieure
sim simulé
th théorique

1. Introduction

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi (ou valeur U) est un paramètre essentiel pour évaluer les pertes de chaleur et déterminer les besoins énergétiques d'un bâtiment. Il peut être évalué théoriquement selon la méthodologie décrite dans la norme ISO 6946 ou mesuré expérimentalement à l'aide de méthodes *in situ* telles que la méthode fluxmétrique (HFM) [1,2], la méthode thermométrique [3] ou la thermographie infrarouge quantitative [4,5]. En raison de sa simplicité, la méthode HFM, décrite dans la norme ISO 9869-1, est la plus utilisée. Cette méthode consiste à mesurer les flux de chaleur à l'aide d'un fluxmètre et les températures de surface à l'aide de deux thermocouples. Elle a été largement testée sur des murs fait de matériaux non hygroscopiques. Il a été démontré que plusieurs facteurs influencent la précision de cette méthode, notamment la perturbation du flux thermique causée par le fluxmètre [6], l'émissivité du fluxmètre par rapport à la surface du mur [7], le positionnement du thermocouple, ainsi que la taille, la forme et l'orientation du fluxmètre [8], la qualité du contact entre le fluxmètre et le mur [2] ou encore le niveau de gradient de température à travers le mur [2,4,9,10]. Toutes ces études ont montré que le coefficient de transmission thermique peut être évaluée avec une incertitude allant de 14 à 30 %.

Des études récentes ont vu l'émergence de parois plus perspirantes, du fait d'une meilleure gestion de l'humidité dans les parois [11-13] ou dans les ambiances intérieures [12], tout en conservant un potentiel de séchage important [13]. Ces parois intègrent souvent des bétons biosourcés [14-17]. Des transferts couplés de chaleur et d'humidité se produisent dans ces parois, ce qui peut influencer leur coefficient de transmission thermique. Néanmoins, les études bibliographiques concernant les effets de l'humidité sur les mesures *in situ* du coefficient de transmission thermique sont rares. Nicolajsen [18] a comparé le coefficient de transmission thermique d'une paroi isolée avec de la ouate de cellulose à une paroi isolée avec de la laine de roche dans un climat danois réel. Les résultats ont montré que la teneur en humidité, atteignant jusqu'à 18 % en hiver, n'avait pas d'impact significatif sur les valeurs mesurées. Latif et al. [19] ont comparé des panneaux isolants en chanvre à la laine de roche avec un coefficient de transmission thermique théorique similaire dans différentes conditions. Ils ont constaté que le coefficient de transmission thermique augmentait avec l'augmentation de la teneur en humidité, avec une augmentation légèrement plus importante pour les panneaux isolants en chanvre. Dans une autre étude, ils ont comparé trois panneaux avec des valeurs U théoriques identiques dans des conditions hivernales [20]. Les résultats ont indiqué que le panneau biosourcé avait des valeurs U plus élevées que les panneaux traditionnels, soulignant l'influence de l'humidité sur les matériaux hygroscopiques. Ces études ne prennent en compte que l'augmentation de la valeur U résultant de l'augmentation de la teneur en humidité. Cependant, la situation est plus complexe, car l'humidité peut avoir des effets supplémentaires sur les mesures, comme le transfert de chaleur latente en surface.

Cette communication se concentre donc sur l'influence du transfert d'humidité sur le coefficient de transmission thermique (valeur U) de parois à ossature bois par une combinaison d'analyses expérimentales et numériques. En outre, l'étude évalue la précision de la méthode du flux thermique (HFM) pour saisir les effets complets du transfert d'humidité.

2. Matériaux et méthodes

Six parois à ossature bois distincts sont étudiées (voir Figure 1). Les cadres ont une largeur de 880 mm et une hauteur de 970 mm (ce qui correspond à une surface de 0,85 m²) et leur épaisseur est de 220 mm, ce qui correspond à l'épaisseur de la couche d'isolation.

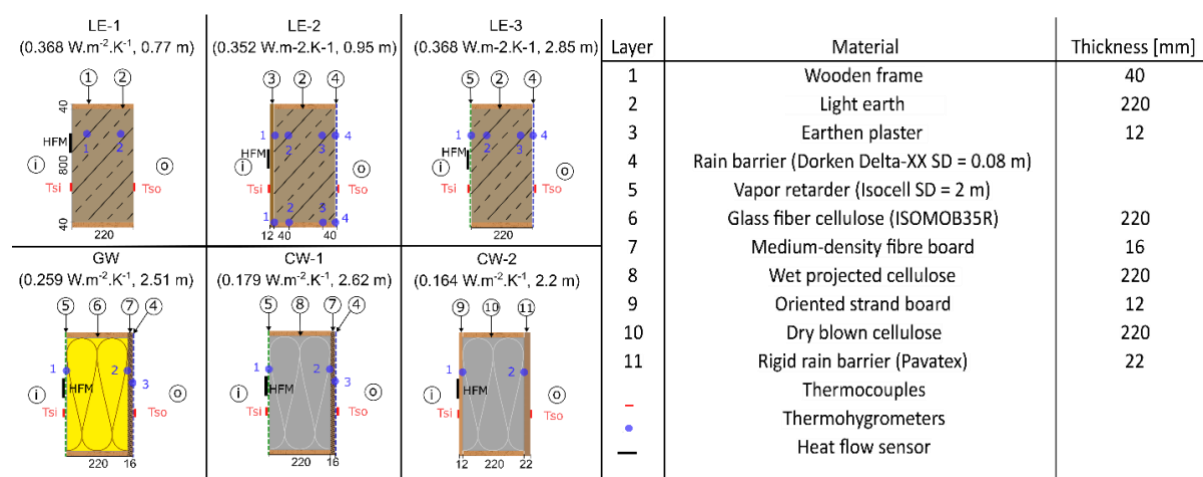


Figure 1 : Vue de l'ensemble des parois étudiées (incluant leur valeur théorique de U et de Sd), de leur composition et la localisation de capteurs.

Les parois testées sont composées de :

- LE-1 : terre allégée projetée, séchée, sans couche de finition ;
- LE-2 : terre allégée projetée, séchée, recouverte d'un pare-pluie à l'extérieur et d'un enduit de terre à l'intérieur ;
- LE-3 : terre allégée projetée, séchée, recouverte d'un pare-pluie à l'extérieur et d'un pare-vapeur à l'intérieur ;
- CW-1 : ouate de cellulose projetée, séchée, recouverte d'un pare-pluie à l'extérieur et d'un pare-vapeur à l'intérieur ;
- CW-2 : ouate de cellulose sèche insufflée en vrac avec un pare-pluie rigide à l'extérieur et de l'OSB à l'intérieur ;
- GW : fibre de verre avec un pare-pluie à l'extérieur et un pare-vapeur à l'intérieur. La paroi GW est non hygroscopique, ce qui signifie que l'humidité ne devrait pas avoir d'influence significative sur son comportement thermique et qu'elle peut être prise comme référence.

Les propriétés thermiques et hydriques des matériaux sont soit mesurées en laboratoire, soit fournies par le fabricant. Elles sont présentées dans le Tableau 1 (les isothermes de sorption sont caractérisées par les paramètres GAB W_m , K et C). En utilisant ces propriétés, les murs testés ont un coefficient de transmission thermique théorique allant de 0,16 à 0,37 $W.m^{-2}.K^{-1}$ et des valeurs Sd allant de 0,77 à 2,85 m.

| Matériaux | ρ [kg.m ⁻³] | $\lambda(w)$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | μ [-] | Sd [m] | c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | GAB parameter | | |
|-----------------|---------------------------------|---|--------------|-----------|---|---------------|-------|-------|
| | | | | | | W_m [-] | K [-] | C [-] |
| Cellulose | 50 | 0.01w + 0.041 | 1.5 | | 1250 | 0.050 | 0.87 | 14 |
| Glass wool | 50 | 0.036 | 1 | | 840 | 0.012 | 0.79 | 1086 |
| Light earth | 260 | 0.23w + 0.081 | 3.5 | | 1003 | 0.026 | 0.87 | 8 |
| OSB | 600 | 0.13 | 150 | | 2100 | 0.055 | 0.79 | 7 |
| Earthen plaster | 500 | 0.1 | 8 | | 1003 | 0.006 | 0.91 | 18 |
| Rigid RB | 200 | 0.044 | 3 | | 1300 | 0.049 | 0.84 | 8 |
| MDF | 550 | 0.09 | 13 | | 1300 | 0.052 | 0.80 | 7 |
| VR | | N/A | | 2 | | N/A | | |
| RB | | | | 0.08 | | | | |

Tableau 1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux constitutifs des parois.

Les parois sont instrumentées de capteurs de température et d'humidité relative (capteurs SHT85 d'une précision de $\pm 0,1$ °C et $\pm 1,5$ % rh). Ces capteurs sont insérés dans la terre allégée à 40 mm des surfaces extérieures, aux interfaces entre les différents matériaux et dans les environnements intérieur et extérieur. Des thermocouples de type K sont placés sur les surfaces intérieures et extérieures. Des fluxmètres (capteur C50 Captec) minces, carrés (50 x 50 mm²) et rigides sont fixés sur la surface intérieure à l'aide d'un ruban adhésif double face. Ils sont recouverts de rubans noirs ou de pare-vapeur (en fonction des couches de finition de chaque paroi) afin que l'émissivité des fluxmètres soit similaire à celle de la surface des parois. Les données sont enregistrées toutes les 5 minutes. Les parois instrumentées sont installées dans une chambre bi-climatique, où les températures et humidités relatives sont contrôlées indépendamment de part et d'autre des parois.

Afin de mieux appréhender les résultats expérimentaux, les expériences sont simulées à l'aide d'un modèle classique de transfert de chaleur et d'humidité [21]. Les propriétés des matériaux sont celles présentées dans le Tableau 1. Le coefficient de transfert thermique total à la surface, qui comprend à la fois le rayonnement et la convection dans l'enceinte, est compris entre 8 et 10 $W.m^{-2}.K^{-1}$ pour les surfaces intérieures (en fonction de l'émissivité de la surface

du mur) et est fixé à $10 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$ pour les surfaces extérieures. Le coefficient de transfert d'humidité par convection est déterminé par la relation de Lewis. Les températures et humidités relatives ambiantes mesurées sont utilisées comme conditions limites, tandis que les températures et humidités relatives mesurées localement sont extrapolées sur l'épaisseur de la paroi pour définir les conditions initiales.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse des résultats expérimentaux

Le protocole expérimental appliqué consiste à fixer un gradient de température tout en faisant varier le gradient de pression de vapeur. Ici, deux tests sont effectués : un gradient de pression de vapeur presque nul (Test 1) et un gradient de pression de vapeur significatif allant de l'extérieur vers l'intérieur, s'alignant sur la direction du flux de chaleur (Test 2). Les variations de température et de pression de vapeur dans les chambres intérieure et extérieure sont présentées sur la Figure 2. Les conditions dans la chambre extérieure sont contrôlées correctement par des systèmes CVC. En revanche, le contrôle des conditions dans la chambre intérieure à l'aide de systèmes CVC entraîne de fortes perturbations dans la mesure du flux thermique. Par conséquent, les conditions intérieures ne sont pas contrôlées et sont égales à celles du laboratoire. La température intérieure fluctue entre 20 et $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui entraîne une différence de température de 10 à $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ tout au long de l'expérience. La pression de vapeur intérieure fluctue autour de $1500 \pm 500 \text{ Pa}$ tout au long de l'essai : une différence de pression de vapeur limitée est notée pour le Test 1 ($< 300 \text{ Pa}$) tandis qu'une grande différence de pression de vapeur est maintenue pour le Test 2 ($> 2600 \text{ Pa}$). Les deux tests durent 7 semaines, de sorte que l'état d'équilibre hygrothermique puisse être atteint dans toutes les parois.

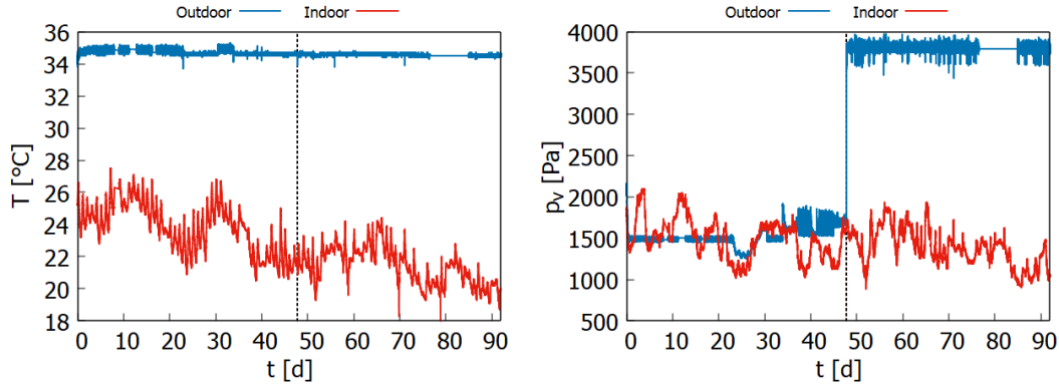


Figure 2 : Évolution temporelle des températures et pressions de vapeur intérieure et extérieure.

Les valeurs de U expérimentales U_{exp} sont calculées pour toutes les parois en utilisant la méthode moyenne proposée par la norme ISO 9869-1 sur les 5 derniers jours :

$$U_{Average} = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sej} - T_{si j})} \quad (1)$$

Les valeurs U_{exp} sont présentées sur la Figure 3 pour les parois en terre allégée et sur la Figure 4 pour les parois réalisées avec un matériau isolant léger. En l'absence de gradient de pression de vapeur (Test 1), la différence entre U_{exp} et la valeur théorique U_{th} est inférieure à 10 % (sauf pour LE-1). Ces différences sont dues à l'hypothèse d'une conductivité thermique sèche lors du calcul de U_{th} et aux incertitudes expérimentales. Ici, une incertitude de $\pm 5,1 \text{ } \%$ est déterminée à l'aide de la méthode de propagation des erreurs, en tenant compte d'une incertitude de 5 %

dans la mesure du flux thermique et d'une incertitude de 1 % dans les mesures de température. En présence d'un gradient de pression de vapeur (Test 2), U_{exp} tend à augmenter (sauf pour LE-1), légèrement pour les murs en terre allégée (de 7 % et 17 % pour LE-2 et LE-3 respectivement) et significativement pour les autres murs (presque de 50 %).

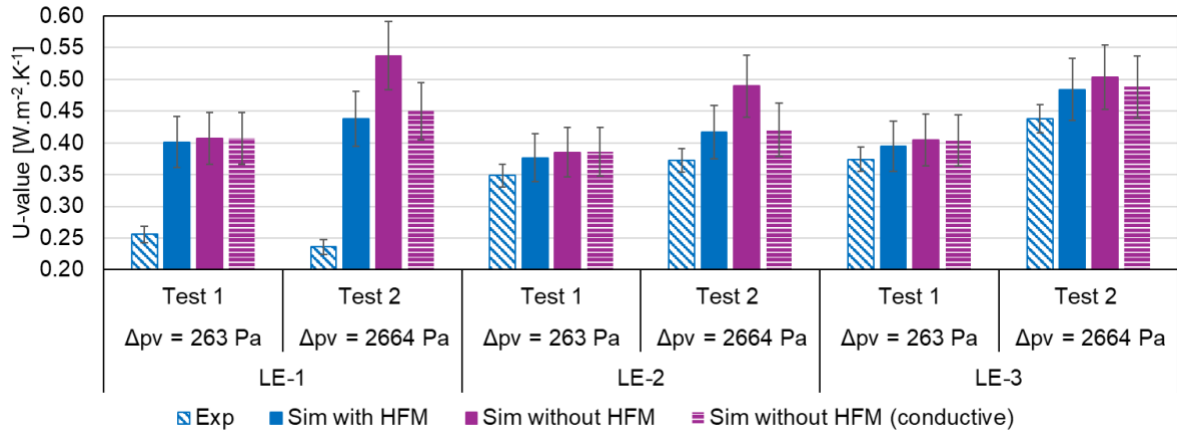


Figure 3 : Valeurs de U mesurées et simulées selon différentes hypothèses pour les parois en terre allégée.

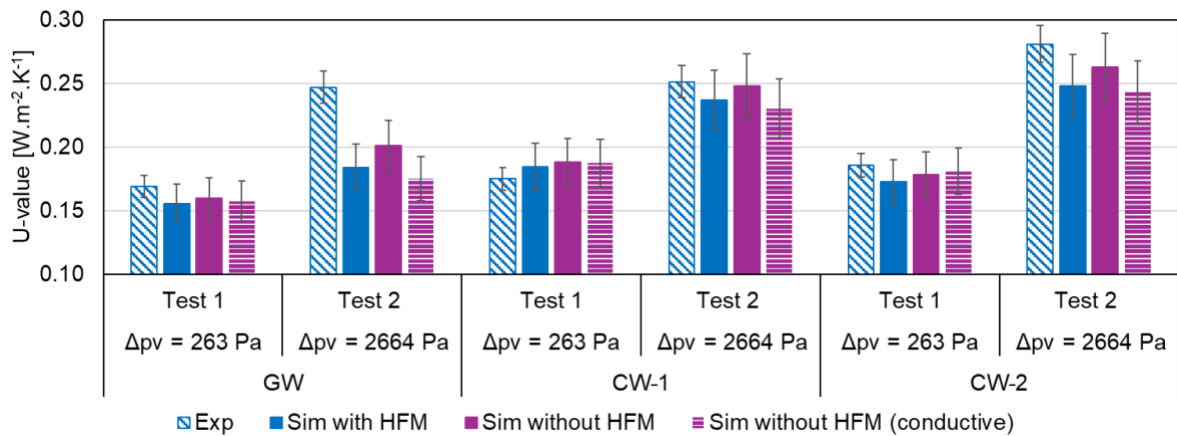


Figure 4 : Valeurs de U mesurées et simulées selon différentes hypothèses pour les parois réalisées avec un matériau isolant léger.

Pour expliquer ces augmentations, des simulations hygrothermiques sont effectuées en tenant compte de la présence physique du fluxmètre. Ce dernier est modélisé par l'ajout d'une couche étanche à l'humidité de 50 mm de côté sur la face intérieure du mur. Les valeurs simulées U_{sim} sont calculées selon l'équation (1) en utilisant les températures de surface et les flux de chaleur simulés. Les résultats sont présentés sur les Figures 3 et 4. En supposant des incertitudes de simulation de $\pm 10\%$ (dues à l'incertitude de la conductivité thermique d'entrée), U_{sim} est en accord avec U_{exp} , à l'exception de deux cas. Premièrement, U_{exp} présente des valeurs inférieures à U_{sim} pour la paroi LE-1. Ces erreurs sont attribuées à un contact thermique imparfait entre le fluxmètre et la paroi en terre allégée, qui présente une surface très rugueuse. Deuxièmement, U_{exp} est beaucoup plus élevé que U_{sim} pour la paroi GW pour le Test 2. Dans ce cas, la simulation indique une humidité relative élevée derrière le pare-vapeur. Or, les simulations sont effectuées avec une conductivité thermique sèche pour le mur GW, négligeant ainsi ses augmentations à un taux d'humidité élevé et diminuant ainsi U_{sim} .

Les simulations du test 2 montrent également que l'humidité peut être bloquée derrière le fluxmètre, ce qui souligne que l'ajout d'un fluxmètre à la surface du mur interfère avec le comportement hygrothermique du mur. Pour évaluer l'influence du fluxmètre sur l'évaluation de la valeur U, des simulations hygrothermiques supplémentaires ont été effectuées sans fluxmètre. Dans ce cas, le flux thermique de surface simulé comprend à la fois les effets de conduction thermique et les effets latents associés au transfert d'humidité :

$$\varphi_{tot} = -\lambda \nabla T + Lv(D_v^\phi \nabla \phi + D_v^T \nabla T) \quad (1)$$

Pour évaluer la contribution du transfert de chaleur latente dans U_{sim} , les valeurs conductives U_{cond} sont calculées en utilisant le flux de chaleur conductif décrit :

$$\varphi_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Pour le Test 1, les valeurs simulées U_{sim} avec et sans fluxmètre sont logiquement similaires, les différences étant inférieures à 3 % (voir Tableau 2). En l'absence de gradient de pression de vapeur, le flux d'humidité et donc le flux de chaleur latente en surface s'annulent. Pour le Test 2, U_{sim} sans fluxmètre sont plus élevés de 3,8% à 18% que U_{sim} avec fluxmètre (voir Tableau 2). Plus le mur est perméable à la vapeur, plus la différence est importante. En revanche, les U_{sim} avec fluxmètre correspondent bien à U_{cond} .

| Paroi | Difference [%] | | Sd [m] |
|-------|---------------------------------|----------------------------------|--------|
| | Test 1 ($\Delta p_v < 300$ Pa) | Test 2 ($\Delta p_v > 2600$ Pa) | |
| LE-1 | 1.5 | 18.5 | 0.77 |
| LE-2 | 2.3 | 14.8 | 0.95 |
| LE-3 | 2.6 | 3.8 | 2.85 |
| GW | 2.9 | 8.5 | 2.51 |
| CW-1 | 1.8 | 4.6 | 2.62 |
| CW-2 | 3 | 5.7 | 2.2 |

Tableau 2 : Différences entre les valeurs simulées de U en présence ou non du fluxmètre.

Enfin, en comparant les simulations réalisées sans fluxmètre pour les Test 1 et 2, on note que U_{sim} augmente avec le gradient de pression de vapeur quel que soit le mur. Pour les parois les moins perméables, cette augmentation est principalement due à l'augmentation de la teneur en humidité de la paroi, qui augmente la conductivité thermique moyenne du matériau d'isolation hygroscopique du bâtiment et donc U_{cond} . En revanche, pour les murs les plus perméables (LE-1 et LE-2), la contribution du flux de chaleur latente de surface à l'augmentation d' U_{sim} est plus importante (jusqu'à 18,5 %).

3.2. Étude numérique de l'influence des transferts d'humidité sur la valeur de U

Quatre simulations supplémentaires sont réalisées pour conforter l'influence des transferts d'humidité sur la valeur de U. Les conditions de simulation sont résumées dans le Tableau 3. Dans trois cas, les flux de chaleur sont orientés de l'extérieur vers l'intérieur (avec une différence de température constante de 9 °C) et les différences de pression de vapeur entre l'extérieur et l'intérieur varient de valeurs négatives (flux de vapeur opposé au flux de chaleur) à des valeurs positives (flux de vapeur dans la même direction que le flux de chaleur). Dans le quatrième cas, la différence de pression de vapeur est négative, mais le flux de vapeur est dans le même sens que le flux de chaleur (de l'intérieur vers l'extérieur).

Pour toutes les parois, les valeurs U_{sim} sont calculées à l'aide de l'équation (1) une fois que le régime permanent est atteint pour chaque cas et sont comparées aux valeurs U_{sim} calculées

pour le cas 2 (c'est-à-dire en l'absence de différence de pression de vapeur) afin d'évaluer les effets latents sur la valeur U. Ces effets latents sont représentés sur la Figure 5 en fonction de la différence de pression de vapeur entre l'extérieur et l'intérieur multipliée par le signe du flux de chaleur (positif lorsque la chaleur circule de l'extérieur vers l'intérieur et négatif dans le cas contraire). L'effet latent est positif (c'est-à-dire que le flux de vapeur augmente la valeur de U) lorsqu'il s'aligne sur la direction du flux de chaleur (en été comme en hiver) et négatif lorsque la vapeur s'écoule dans la direction opposée au flux de chaleur. Une augmentation quasi-linéaire est observée quelle que soit la paroi, mais aucune corrélation n'est actuellement établie entre la pente et les matériaux ou les propriétés de la paroi.

| Case | Indoor | | Outdoor | | Δp_v [Pa] |
|------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|----------------------|
| | T [°C] | Φ [%rh] | T [°C] | Φ [%rh] | |
| 1 | 21 | 61 | 30 | 29 | -300 |
| 2 | | | 30 | 36 | 0 |
| 3 | | | 30 | 73 | 1500 |
| 4 | | | 10 | 73 | -590 |

Tableau 3 : Conditions de simulations supplémentaires.

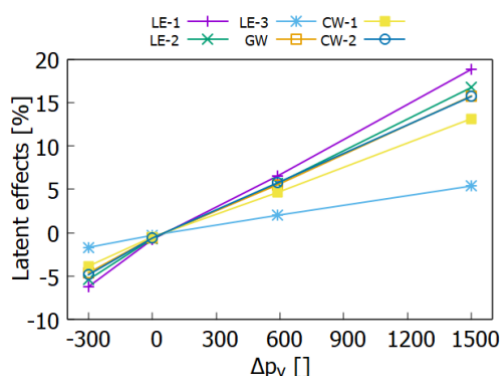


Figure 5 : Effets latents dus au transfert d'humidité sur les valeurs de U en fonction de la différence de pression de vapeur multipliée par le signe du flux de chaleur.

4. Conclusions

Cette étude a examiné l'influence du transfert d'humidité sur le coefficient de transmission thermique (valeur U) des murs à ossature bois isolés, en combinant des analyses expérimentales et numériques. Six murs instrumentés de conception différente ont été testés dans une chambre bi-climatique. La valeur U est mesurée avec HFM en imposant un gradient de température presque constant et en faisant varier le gradient de pression de vapeur. Des simulations hygrothermiques, incluant ou non la présence de HFM, ont été réalisées pour étayer les données expérimentales. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- En l'absence de gradient de pression de vapeur, les valeurs de U mesurées correspondent aux valeurs de U théoriques et simulées, compte tenu des incertitudes expérimentales et numériques et de la complexité du dispositif expérimental.
- En présence d'un gradient de pression de vapeur dans le sens du gradient de température, la valeur de U mesurée et simulée a augmenté jusqu'à 50 % en raison de l'accumulation d'humidité dans les murs les moins perméables et également en raison du flux de chaleur latente en surface pour les murs les plus perméables. Ce résultat mériterait d'être étendu à d'autres types de parois.
- L'ajout d'un fluxmètre étanche à l'humidité sur la surface bloque le transfert d'humidité en présence d'un gradient de pression de vapeur. Seule la contribution conductrice de la valeur de U peut être mesurée et des erreurs allant jusqu'à 18% peuvent être commises sur la valeur de U. Des méthodes fiables permettant de mesurer ces effets latents restent à développer.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du support financier de l'ADEME via le projet Locabati.

Références

- [1] Gaspar K., Casals M., Gangolells M., In Situ Measurement of Façades with a Low U-Value: Avoiding Deviations. *Energy Build.*, 170 (2018), 61–73.
- [2] Ficco G., Iannetta F., Ianniello E., d'Ambrosio Alfano F.R., Dell'Isola M., U-Value in Situ Measurement for Energy Diagnosis of Existing Buildings. *Energy Build.*, 104 (2015), 108–21.
- [3] Bienvenido-Huertas D., Rodríguez-Álvaro R., Moyano J.J., Rico F., Marín D., Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. *Energies* 11 (2018), 360.
- [4] Albatici R., Tonelli A.M., Infrared Thermovision Technique for the Assessment of Thermal Transmittance Value of Opaque Building Elements on Site. *Energy Build.* 42 (2010), 2177–83.
- [5] François A., Ibos L., Feuillet V., Meulemans J., In Situ Measurement Method for the Quantification of the Thermal Transmittance of a Non-Homogeneous Wall or a Thermal Bridge Using an Inverse Technique and Active Infrared Thermography. *Energy Build.* 233 (2021), 110633.
- [6] Cucumo M., Ferraro V., Kaliakatsos D., Mele M., On the Distortion of Thermal Flux and of Surface Temperature Induced by Heat Flux Sensors Positioned on the Inner Surface of Buildings. *Energy Build.* 158 (2018), 677–83.
- [7] Cesaratto P.G., De Carli M., Marinetti S., Effect of Different Parameters on the in Situ Thermal Conductance Evaluation. *Energy Build.* 43 (2011), 1792–1801.
- [8] Meng X., Yan B., Gao Y., Wang J., Zhang W., Long E., Factors Affecting the in Situ Measurement Accuracy of the Wall Heat Transfer Coefficient Using the Heat Flow Meter Method. *Energy Build.* 86 (2015), 754–65.
- [9] Gori V., Elwell C.A., Estimation of Thermophysical Properties from In-Situ Measurements in All Seasons: Quantifying and Reducing Errors Using Dynamic Grey-Box Methods. *Energy Build.* 167 (2018), 290–300.
- [10] Desogus G., Mura S., Ricciu R., Comparing Different Approaches to in Situ Measurement of Building Components Thermal Resistance. *Energy Build.* 43 (2011), 2613–20.
- [11] McClung R., Ge H., Straube J., Wang J., Hygrothermal Performance of Cross-Laminated Timber Wall Assemblies with Built-in Moisture: Field Measurements and Simulations. *Build Env.* 71 (2014), 95–110.
- [12] Mlakar J., Štrancar J., Temperature and Humidity Profiles in Passive-House Building Blocks. *Build Env.* 60 (2013), 185–93.
- [13] Lstiburek J.W., Understanding Vapor Barriers. *ASHRAE Journal* (2004).
- [14] Piot A., Béjat T., Jay A., Bessette L., Wurtz E., Barnes-Davin L., Study of a Hempcrete Wall Exposed to Outdoor Climate: Effects of the Coating. *Const Build Mat.* 139 (2017), 540–50.
- [15] Shea A., Lawrence M., Walker P., Hygrothermal Performance of an Experimental Hemp–Lime Building. *Const Build Mat.* 36 (2012), 270–75.
- [16] Lelievre D., Colinart T., Glouannec P., Hygrothermal Behavior of Bio-Based Building Materials Including Hysteresis Effects: Experimental and Numerical Analyses. *Energy Build.* 84 (2014), 617–27.
- [17] Evrard A., A. De Herde, Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies. *J Build Phys.* 34 (2010), 5–25.
- [18] Nicolajsen A., Thermal Transmittance of a Cellulose Loose-Fill Insulation Material. *Build Env.* 40 (2005), 907–14.
- [19] Latif E., Ciupala M.A., Wijeyesekera D.C., The Comparative in Situ Hygrothermal Performance of Hemp and Stone Wool Insulations in Vapour Open Timber Frame Wall Panels. *Const Build Mat.* 73 (2014), 205–13.
- [20] Latif E., Lawrence M., Shea A.D., Walker P., An Experimental Investigation into the Comparative Hygrothermal Performance of Wall Panels Incorporating Wood Fibre, Mineral Wool and Hemp-Lime. *Energy Build.* 165 (2018), 76–91.
- [21] El Assaad M., Colinart T., Lecompte T., Thermal conductivity assessment of moist building insulation material using a Heat Flow Meter apparatus. *Build Env.* 234 (2023), 110184.