

Etude expérimentale des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi hygroscopique et perméable à la vapeur – Analyse expérimentale de l'impact de l'inhomogénéité des conditions de surface et de singularités sur les transferts.

Maxime PERIER-MUZET^{1*}, Timea BEJAT², Yannick-Ariel KEDOWIDE¹, Cédric POINARD¹, Didier THERME², Monika WOLOSZYN¹

¹LOCIE, UMR 5271 – Université de Savoie, Polytech Annecy- Chambéry Savoie Technolac - 73376 Le Bourget du Lac, France.

²CEA, LITEN, Laboratoire d'Energétique du Bâtiment, INES, Le Bourget Du Lac, France.

* (auteur correspondant : maxime.perier-muzet@univ-savoie.fr)

Résumé – L'étude des transferts d'humidité et de chaleur dans les parois des bâtiments fait l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique. En effet, avec le développement de bâtiments à faible consommation énergétique, mettant pour certains en œuvre des matériaux fortement hygroscopiques dans leur enveloppe, se pose la question de l'impact des transferts d'humidité sur les performances énergétique de ces ouvrages. Malgré les développements récents dans ce domaine, il y a un besoin persistant d'évaluation et de compréhension de l'impact du transfert de masse sur les performances thermiques de parois complexes composées de matériaux très hygroscopiques. L'élément d'enveloppe étudié dans le cadre de cette étude est une paroi de plus de 6 m² à ossature bois avec une isolation en fibre de bois. Les revêtements extérieur et intérieur de cette paroi sont respectivement un enduit minéral et des panneaux d'OSB. Afin d'étudier expérimentalement le comportement de cet élément un dispositif expérimental a été construit sur une cellule PASSYS orientable du CEA-INES. Cet outil expérimental permet d'étudier la paroi avec comme sollicitation interne une ambiance contrôlée en température et en humidité et comme sollicitation externe les conditions climatiques réelles. Pour permettre le suivi du comportement hygrothermique de la paroi une métrologie complète a été mise en œuvre. Cette dernière se compose de quarante-deux thermo-hygromètres et trente-six thermocouples pour les mesures de températures et d'humidités de l'air et au sein de la paroi ; de trois fluxmètres pour les mesures de flux thermiques dans la paroi ; d'un capteur de pression différentiel pour la mesure de la différence de pression entre l'intérieur de la cellule et l'ambiance ; d'un pyranomètre pour la mesure du flux solaire incident sur la surface externe de la façade. Les conditions météorologiques sont également enregistrées sur le site. Les mesures en surface et à l'intérieur de la paroi sont réalisées à différents emplacements et à cinq profondeurs afin de pouvoir obtenir les profils de températures et d'humidités à ces endroits de la paroi. En complément des mesures de températures de surface réalisées avec les thermocouples et les thermo hygromètres, des mesures par thermographie avec une caméra infra-rouge ont été réalisées sur les surfaces interne et externe de la paroi. Dans cette communication, les résultats des mesures des champs de températures réalisées par thermographie infra-rouge seront présentés et comparés aux mesures réalisées avec les thermocouples et thermo-hygromètres. L'analyse des profils de températures et d'humidités à travers la paroi à différents emplacements permettront d'étudier l'impact de l'inhomogénéité des températures de surface et des singularités de la paroi (éléments de l'ossature, liaisons avec la cellule) sur les transferts d'humidité et de chaleur.

Nomenclature

e	épaisseur, cm	<i>Indices et exposants</i>
h	hauteur, m	env environnement
HR	humidité relative, %	ext extérieure
l	largeur, m	int intérieur
T	température, $^{\circ}C$	h horizontal
U	coefficient global d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	v vertical
<i>Symboles grecs</i>		
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	

1. Introduction

L'étude des transferts d'humidité et de chaleur dans les parois des bâtiments fait l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique. Ainsi de nombreuses études numériques ont été réalisées et de nombreuses installations expérimentales dans des conditions contrôlées ou en climat extérieur ont été développées et expérimentées [1]. Avec le développement de bâtiments à faible consommation énergétique, mettant pour certains en œuvre des matériaux fortement hygroscopiques dans leur enveloppe, se pose la question de l'impact des transferts d'humidité sur les performances énergétiques de ces ouvrages. L'influence des transferts d'humidité sur les champs de température à l'intérieur des murs et sur le confort intérieur a déjà été analysée [2], [3] et [4]. Malgré les développements récents dans ce domaine, l'impact du transfert de masse sur les performances thermiques de parois complexes composées de matériaux très hygroscopiques n'est pas encore bien connu et son évaluation nécessite de nouvelles études.

Afin de mieux évaluer les effets des transferts couplés dans les parois, de nouveaux travaux numériques et expérimentaux ont été entrepris dans le cadre du projet collaboratif HYGRO-BAT financé par l'ANR à travers le programme HABISOL 2010. Parmi les travaux menés lors de ce projet une étude expérimentale a été réalisée pour caractériser le comportement dynamique d'éléments d'enveloppes hautement perméables à la vapeur et très hygroscopiques. La campagne de mesures pour caractériser le comportement de cette paroi à durée 18 mois et c'est achevée le 17 janvier 2015. Au cours de cette campagne, de nombreuses conditions opératoires (différentes températures et humidités relatives internes) ainsi que différentes orientations de la paroi (nord ou sud) ont été étudiées. Lors des 12 premiers mois de la campagne expérimentale, deux dispositifs expérimentaux identiques (deux cellules PASSYS équipées de parois tests identiques et utilisant la même instrumentation) ont été mobilisés. La comparaison des résultats obtenus à partir de ces deux bancs identiques a permis de vérifier la reproductibilité des mesures effectuées. La présentation des résultats expérimentaux sur les parties courantes des parois (mesures réalisées loin des ponts thermiques) sur de longues périodes a déjà fait l'objet de plusieurs communications [5] et [6]. L'objectif de la présente communication est de décrire le comportement hygrothermique de la paroi en considérant les singularités liées à la structure de cet élément et à ces liaisons avec le reste du dispositif expérimental. En effet, la plupart des analyses réalisées sur les performances énergétiques des enveloppes à l'échelle du bâtiment considèrent une approche unidimensionnelle des transferts au sein de ces éléments. Ainsi, le travail présenté dans ce document se propose de donner des éléments de validation de cette hypothèse pour une paroi légère complexe.

La première partie de ce document présente le dispositif expérimental qui a été développé pour mener cette étude. Les conditions d'essais sont ensuite décrites. Enfin, les résultats d'une semaine de mesures de températures et d'humidités relatives réalisées à différents endroits

de la paroi et à différentes profondeurs à l'aide de thermocouples, de thermo-hygromètres et d'une caméra infrarouge sont présentés et discutés.

2. Présentation du dispositif expérimental

L'élément d'enveloppe étudié dans le cadre de cette étude est une paroi de plus de 6 m² à ossature bois avec une isolation en fibre de bois. Les revêtements extérieur et intérieur de cette paroi sont respectivement un enduit minéral et des panneaux de particules de bois orientées (OSB pour Oriented Strand Board).

2.1 Cellule PASSY

Les cellules PASSYS sont conçues pour tester des composants solaires passifs en conditions climatiques réelles. Elles sont posées sur une structure métallique liée à une plateforme tournante. Elles sont décollées du sol afin de permettre la circulation de l'air sur l'ensemble de ces parois. Cinq de ces parois sont fortement isolées ($U = 0,09 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), imperméables à l'eau grâce à leur revêtement métallique extérieur et imperméables à la vapeur grâce à l'utilisation d'un pare vapeur au niveau de leur surface intérieure. La sixième paroi est réservée pour l'élément d'enveloppe à tester qui peut mesurer jusqu'à 3,6 m de large pour 3,3 m de hauteur. Cet élément est posé en applique sur un cadre devant la cellule.

La cellule est équipée d'une centrale de traitement de l'air qui permet un control de la température intérieure et de l'humidité relative. Grâce à cet équipement, la température de l'air intérieur peut être contrôlée de 15 à 35 °C avec une tolérance de +/- 1 °C et l'humidité de l'air intérieur peut être réglée de 6 à 14 g/kg d'air sec avec une tolérance de +/- 10 %.

2.2 Description de l'élément d'enveloppe étudié

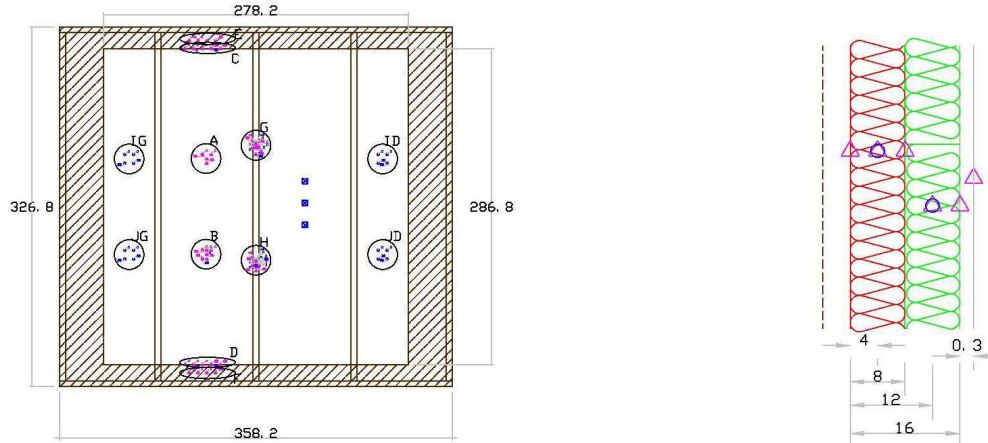


Figure 1 : Implantation des capteurs vue de face de la paroi à gauche et vue en coupe de la partie courante à droite (dimensions en cm)

L'élément d'enveloppe étudié est une paroi à ossature bois avec une isolation en fibre de bois (fig. 1). La structure de la paroi est composée de deux traverses en épicéa ($\lambda = 0,09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $HR = 40 \%$ et $\lambda = 0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $HR = 98 \%$) de section 5×12 cm (une en bas et une en haut de la paroi) reliées par cinq montants verticaux de sections et de matériau identiques aux traverses. La surface intérieure de la paroi est composée de panneaux d'OSB de 1 cm d'épaisseur. Ces panneaux sont fixés directement sur l'ossature de la paroi. Les cadres formés par cette ossature sont remplis à l'aide d'isolant en fibre de bois ($\lambda = 0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $HR = 40 \%$ et $\lambda = 0,08 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $HR = 98 \%$), un matériau fortement hygroscopique et perméable à la vapeur avec une masse volumique comprise entre 120-140 kg/m³. Ainsi dans l'épaisseur de l'ossature sont disposées une couche de 4 cm et une couche de 8 cm de panneaux de fibre

de bois. Afin de limiter les ponts thermiques liés à la présence des éléments en bois massif, une couche de 8 cm de fibre de bois est placée sur la surface extérieure de l'ossature. Afin de protéger l'isolation de la pluie, la surface extérieure de la fibre de bois est recouverte avec un enduit minéral d'environ 3 mm d'épaisseur. Ce dernier est à la fois imperméable à l'eau mais il ne constitue pas une barrière à la diffusion de la vapeur d'eau (le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) de l'enduit est inférieur à 25).

L'élément d'enveloppe ainsi obtenu est une paroi légère fortement hygroscopique et perméable à la vapeur mais imperméable à l'eau liquide. Notons que l'ensemble des propriétés thermo-physiques des matériaux ont été mesurées en laboratoire par les partenaires du projet HYGRO-BAT [6] et [7].

2.3 Instrumentation et méthodologie

Au total, 83 capteurs (42 thermo-hygromètres, 36 thermocouples, 3 fluxmètres, 1 capteur de pression différentielle et 1 pyranomètre) ont été utilisés pour instrumenter la paroi. Les caractéristiques techniques des principaux capteurs sont synthétisées dans le tableau 1 et leur implantation au sein de la paroi est indiquée dans la figure 1. Les capteurs de température et l'humidité relative ont été placés à différents endroits spécifiques dans le mur: dans les parties courantes (entre les éléments de l'ossature), à proximité de la structure en bois et au niveau des jonctions avec la structure de la cellule PASSYS. Sur les sites de mesures les capteurs sont disposés à différentes épaisseurs de la paroi : entre chaque couche de matériaux mais également pour certains sites au milieu de la couche d'isolant. Les capteurs disposés à proximité de la structure en bois sont fixés sur la surface et à l'intérieur des poutres.

Afin de vérifier l'uniformité des conditions intérieures le volume de la pièce a été instrumenté avec sept sondes de température type Pt100. De plus, un thermo-hygromètre a été placé au milieu de la chambre pour mesurer l'humidité relative à l'intérieur de la cellule en plus de la sonde de la CTA.

Pour mesurer les conditions extérieures, une station météo située à 50 m de la cellule est utilisée. Elle permet de mesurer entre autres la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la pluviométrie ainsi que le rayonnement solaire. Afin de connaître précisément le rayonnement solaire global qui impacte la surface externe de la paroi (en prenant en compte les masques et la réflexion des bâtiments environnants), un pyranomètre a été placé verticalement sur la façade.

Les données mesurées par les différents capteurs font l'objet d'une acquisition avec un pas de temps d'une minute.

Capteur	Nombre	Spécifications	Précision
Thermocouple	36	Type T	+/- 1 °C
Thermo-hygrometre	42	Fabricant : Sensirion Modèle : SHT 75	+/- 0.3 °C +/-1.8% RH

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des principaux capteurs de la paroi

Une caméra infrarouge a été utilisée de manière ponctuelle pour compléter les mesures des températures de surface réalisées par les thermo hygromètres et les thermocouples. Grâce à ce matériel, les champs de températures sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi ont été mesurés. Pour réaliser des mesures de températures par thermographie infrarouge, les propriétés optiques des matériaux doivent être connues. Pour cette étude, nous avons considéré que les matériaux de surface avaient un comportement de type « corps gris » avec une émissivité (ϵ) de 0,9 pour l'enduit (surface extérieure) et de 0,89 pour les panneaux d'OSB (surface intérieure) [4]. Ces éléments n'absorbent pas la totalité du rayonnement

infrarouge incident (émis par l'environnement) mais en réfléchissent une partie que mesure la caméra infrarouge. Ainsi la température de l'environnement doit être connue afin de corriger la mesure du flux capté par la caméra pour ne considérer que le flux émis par la paroi. La température de l'environnement (T_{env}) est estimée à l'aide d'un matériau très réfléchissant aux infrarouges ne privilégiant aucune direction particulière (ici, des feuilles d'aluminium froissées disposées sur les surfaces). La caméra infrarouge qui a été utilisée pour cette étude est une caméra FLIR SC7200-MB. La résolution de cette dernière est de 320*256 pixels, elle est sensible aux rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 1,5 et 5,1 μm . D'après les données du constructeurs et les études d'incertitudes présenté dans [8] la précision des mesures des températures par thermographie infrarouge est estimée à +/- 1 °C.

3 Résultats et discussion

3.1 Conditions de mesure

Les résultats des températures de surface présentés dans ce document sont issus de mesures réalisées le 6 janvier 2015 entre 9h50 et 10h20. Les figures 2 et 3 présentent l'évolution des températures et de l'humidité relative à l'intérieur (au centre de la cellule) et à l'extérieur de la cellule du 1 au 8 janvier 2015. Durant les cinq jours qui ont précédés les mesures des températures de surface, la température et l'humidité relative à l'intérieur de la cellule (T_{int} et HR_{int}) sont stables et en moyenne respectivement égales à 20,2 °C et 34 % (fig. 2 et fig. 3). Sur cette même période à l'extérieur de la cellule, la température moyenne de l'air (T_{ext}) est de 2 °C avec une valeur minimale de -4,9 °C et une valeur maximale de 11 °C (fig. 2). L'humidité relative de l'air à l'extérieur (HR_{ext}) tend à augmenter au cours du temps pour une humidité moyenne de 92 % avec des valeurs comprises entre 58 et 100 % (fig. 3). Au moment où les mesures considérées pour cette étude ont été réalisées (le 6 janvier 2015 entre 9h50 et 10h20), à l'extérieur l'air est à une température (T_{ext}) de -1,3 °C et une humidité relative (HR_{ext}) de 100 %. La température de l'environnement extérieure (T_{env}^{ext}) est estimée à partir du flux mesuré sur les surfaces réfléchissantes à -2,9 °C alors de celle à l'intérieure (T_{env}^{int}) est estimée à 19,7 °C.

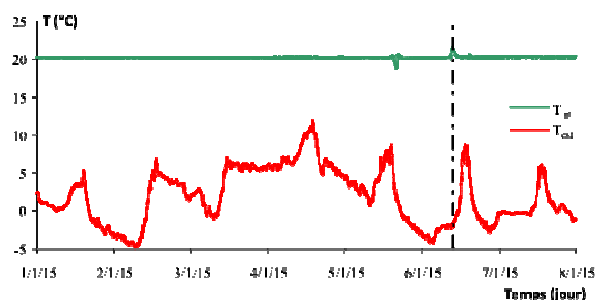


Figure 2 : Température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule en fonction du temps

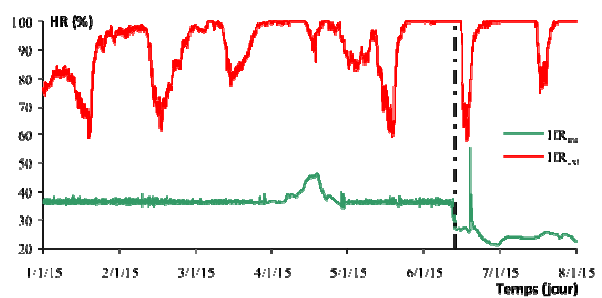


Figure 3 : Humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule en fonction du temps

3.2 Températures de surface

Les mesures des températures de surface ont été réalisées par thermographie infrarouge. Les figures 5 et 6 représentent respectivement la cartographie des températures au niveau de la surface interne et de la surface externe. L'angle d'ouverture de l'objectif de la camera ne permet pas de visualiser l'intégralité de la paroi intérieure en une seule prise de vue. Ainsi, la cartographie de la température de surface interne (fig. 4) est obtenue à partir de six prises de vues différentes. L'analyse de la cartographie, du profil de températures vertical ($T_{v\ int}$) et du profil horizontal ($T_{v\ ext}$) de la surface intérieure permet de mettre en évidence la présence de ponts thermiques liés à l'ossature de la paroi et d'effets de bords. En effet, la présence

d'éléments de l'ossature dont la conductivité thermique est supérieure à celle de la fibre de bois (en contact avec l'OSB dans les parties courantes) génère des ponts thermiques. Ces derniers se caractérisent aux endroits où l'OSB est en contact avec la structure par des températures de surface inférieures de l'ordre de 0,5 °C à celles qui sont observées dans les parties courantes. Ces ponts thermiques sont encore plus visibles sur la partie haute de la paroi aux emplacements des liaisons entre l'ossature et le cadre de la cellule PASSYS. Au niveau de ces singularités, les températures de surface peuvent être inférieures de plus de 1,5 °C à celles des parties courantes. On observe également que les effets de bords sont nettement plus importants sur la partie basse de la paroi que sur les autres arrêtes. En effet la température de la paroi sur la partie basse peut être inférieure à 13 °C. La structure de la paroi est identique sur la partie haute et sur la partie basse ainsi la configuration de la paroi ne peut pas expliquer ce phénomène. L'analyse des profils d'humidité à travers la paroi au point de mesure « F » (fig. 1) a montré qu'en ce point les matériaux étaient extrêmement humides. Au moment du démontage de la paroi expérimentale, la présence d'eau liquide dans la partie basse de la paroi a été observée. La présence d'eau liquide ne permettait plus à la fibre de bois de jouer son rôle d'isolant ce qui générerait une déperdition thermique plus importante dans cette zone. Au niveau des parties courantes sur les zones non impactées par l'effet de bords on remarque une très forte homogénéité des températures de surface. On observe également que les températures de surface de la partie droite de la paroi sont très légèrement supérieures (de l'ordre de 0,1 °C) à celles mesurées sur la partie gauche. Les mesures sur ces deux zones étant réalisées à partir de deux prises de vues différentes cette différence peut être imputée aux erreurs de mesure.

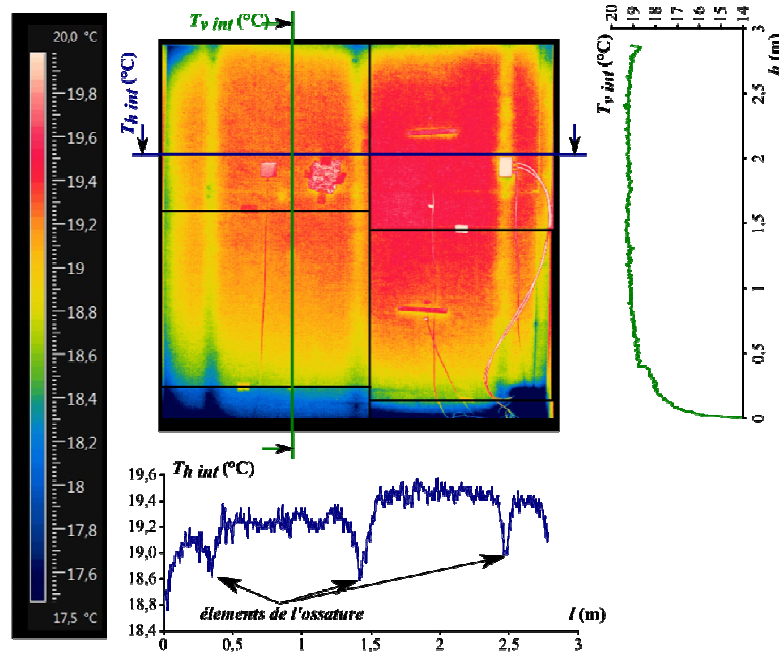


Figure 4 : Cartographie de la température de la surface intérieure (OSB) de la paroi et profils de températures horizontal et vertical sur une partie courante

L'analyse de la cartographie des températures et des profils de températures de la surface extérieure (fig. 5) met à nouveau en évidence la déperdition thermique associée à la présence d'eau liquide dans la partie basse de la paroi. En effet, les températures observées sur cette zone peuvent être supérieures de 1 °C à celles observées au centre de l'élément. A la différence de l'OSB (à l'intérieur) qui est directement en contact avec la structure, l'enduit est isolé de ces éléments par la présence de 8 cm de fibre de bois. Ainsi, la présence de l'ossature ne génère pas d'inhomogénéités significatives des températures sur la surface extérieure de l'enduit.

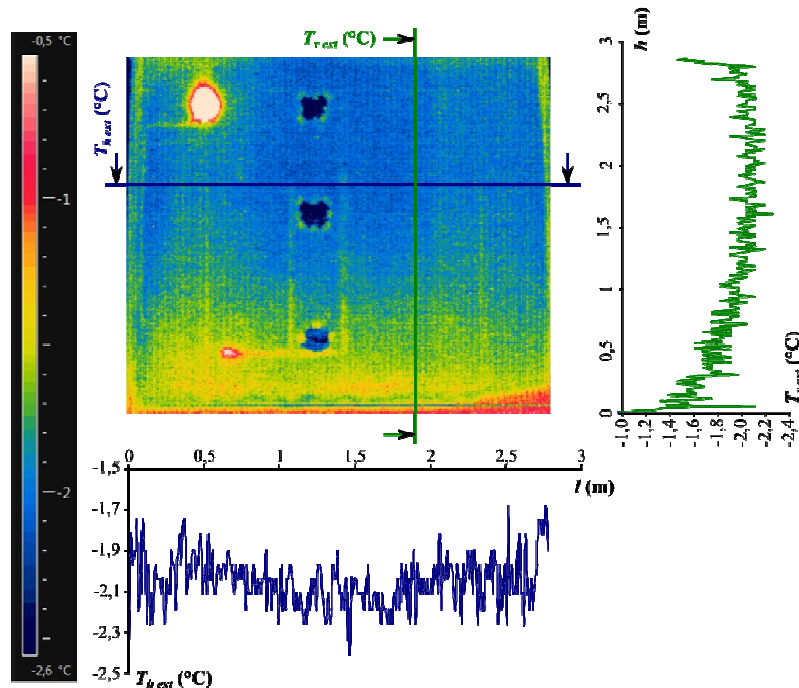


Figure 5 : Cartographie de la température de la surface extérieure (enduit) de la paroi et profils de températures horizontal et vertical sur une partie courante

3.3 Profils de températures et d'humidités relatives à travers la paroi

Les figures 6 et 7 représentent respectivement les profils de températures et d'humidités relatives à travers la paroi pour différents points de mesures. Les températures et les humidités relatives présentées dans ces figures sont les valeurs moyennes des mesures réalisées le 6 janvier 2015 entre 9h50 et 10h20. Les points A et B correspondent à des sites de mesures sur une partie courante alors que les points G et H sont situés au niveau du montant central de la structure (fig. 1). L'analyse de ces résultats montre qu'il y a très peu de différences entre les deux mesures réalisées dans la partie courante (en A et en B) que ce soit en température ($\Delta T_{max\ A-B} < 0,5\text{ °C}$) ou en humidité relative ($\Delta HR_{max\ A-B} < 1,3\%$). On observe également ces faibles écarts entre les mesures faites au niveau de l'ossature (en G et H) avec $\Delta T_{max\ G-H} < 0,7\text{ °C}$ et $\Delta HR_{max\ G-H} < 4,5\%$.

En comparant les profils de température dans la partie courante (points A et B) et ceux au niveau de l'ossature (points G et H), on confirme les observations obtenues par l'analyse des mesures réalisées par thermographie infrarouge ; à la surface intérieure la température au niveau de l'ossature est légèrement plus basse que celle observée sur la partie courante et on n'observe pas de différences de température significatives entre ces deux points d'observation sur la surface externe. Cependant, la conductivité de l'ossature étant supérieure à celle de la fibre de bois, on observe à l'intérieur de la paroi des températures supérieures pour les points H et G. Ces différences restent cependant très faibles, comprises entre 0,7 et 1,5 °C entre 4 et 16 cm d'épaisseur.

De manière similaire, on observe que les humidités relatives mesurées sur les surfaces ne sont pas impactées de manière significative par la présence de l'ossature. Cependant les profils d'humidités relatives à travers la paroi sont différents entre les points de mesures situés dans la partie courante (A et B) et ceux proches de l'ossature (G et H). En effet, la présence des éléments de l'ossature, moins perméable à la vapeur que l'isolant et plus conductrice de chaleur, perturbe localement le transfert d'humidité. On mesure donc des humidités relatives plus basses à l'intérieur de la paroi dans la section de l'ossature que dans la partie courante.

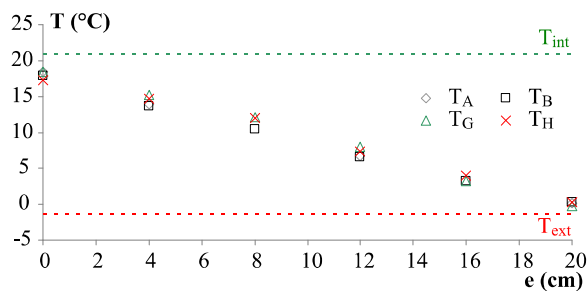


Figure 6 : Profils de températures à travers la paroi pour différents points de mesure

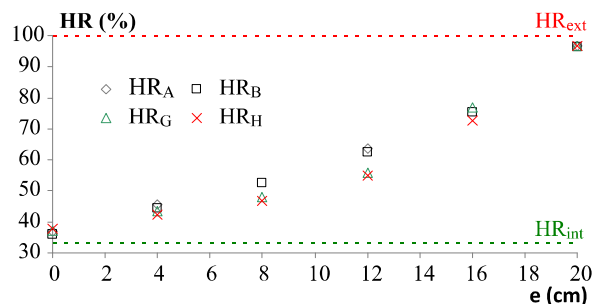


Figure 7 : Profils d'humidité relative à travers la paroi pour différents points de mesure

4 Conclusion

Le comportement hygrothermique d'une paroi légère fortement hygroscopique et perméable à la vapeur a été analysé. Des résultats des mesures des champs de températures réalisées par thermographie infra-rouge ont été présentés et comparés aux mesures réalisées avec les thermocouples et thermo-hygromètres. L'analyse des profils de températures et d'humidités à travers la paroi à différents emplacements a permis d'étudier l'impact des singularités de la paroi (éléments de l'ossature, liaisons avec la cellule) sur les transferts d'humidité et de chaleur. L'impact des singularités sur l'ensemble de la paroi reste faible dans les conditions étudiées et justifie ainsi une approche unidimensionnelle des transferts pour les analyses ultérieures.

Références

- [1] Kédowidé Y., Woloszyn M., Le Pierrès N., Synthèse sur les dispositifs expérimentaux d'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois des bâtiments ; Colloque International Francophone d'Energétique et Mécanique (CIFEM), Ouagadougou, 2012.
- [2] Labat M., Noel M., Woloszyn M., Piot A., Garnier G., Roux J.-J., Comparison of moisture and temperature measurements for six envelope types with different moisture transfer properties. 5th International Building Physics Conference. Kyoto, Japon, 28-31 Mai, 2012.
- [3] Teodosiu C., Hohota C., Rusaouën G., Woloszyn M., 2003, Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment, Building and Environment, Volume 38, Issue 5, Pages 655–664.G.
- [4] Piot A., Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique. Thèse, INSA de Lyon, 2009.
- [5] Kédowidé Y., Woloszyn M., Le Pierrès N., Bejat T., Experimental investigations of highly hygroscopic and vapour permeable walls exposed to real climate, 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden, 15-19 June 2014.
- [6] Woloszyn M. , Le Pierrès N., Kedowidé Y., Virgone J., Trabelsi A., Slimani Z., Mougél E., Reymond R., Rafidiarison H., Perré P., Pierre F., Belarbi R., Issaadi N., Abahri K., Bejat T., Piot A., Wurtz E., Duforestel T., Colmet M., Perrin B., Coutand M., Vololonirina O., Jomaa W., Lauffer S., Thiriet P., Rémond N., Legrand O., Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT, Conférence IBPSA France, Arras, France, 2014
- [7] Oly Vololonirina, Marie Coutand, Bernard Perrin, Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature, Construction and Building Materials, Volume 63, 30 July 2014, Pages 223-233
- [8] M. Labat, M. Woloszyn, G. Garnier, G. Rusaouen, J.-J. Roux. 2012. Impact of direct solar irradiance on heat transfers behind an open-jointed ventilated cladding: experimental and numerical investigations. Solar Energy. Vol 86/9, 2549-2560.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet HYGRO-BAT financé par l'ANR à travers le programme HABISOL 2010.