

Sur l'importance du dessiccant lors de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un isolant en fibre de bois

Thibaut Colinart*¹, Patrick Glouannec¹

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

*thibaut.colinart@univ-ubs.fr

RESUME. La perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction est mesurée habituellement par la méthode de la coupelle selon le protocole défini dans la norme ISO 12572. Pour ce test, un dessiccant capable d'absorber de l'humidité doit être choisi pour maintenir des conditions stables et sèches au sein de la coupelle. Dans cette étude, plusieurs dessiccants mentionnés dans la norme ISO 12572 sont testés et comparés lors de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un isolant en fibre de bois. Pour chaque expérience, les conditions de température et d'humidité relative sont mesurées à l'intérieur de la coupelle. Les résultats montrent qu'une humidité relative proche de 0 % n'est jamais atteinte et que les conditions aux limites ne sont pas stables dans le temps pour ce matériau très perméable. L'impact de ces observations dans le calcul de la perméabilité à la vapeur d'eau est évalué et comparé aux autres sources d'incertitude. Les conséquences sur la prédiction du comportement hygrothermique d'une enveloppe type d'une maison à ossature bois sont enfin évaluées.

MOTS-CLÉS : perméabilité à la vapeur d'eau ; transfert d'humidité ; fibre de bois.

ABSTRACT. Water vapor permeability of building materials is usually measured using dry cup test according to the ISO 12572 standard. For this test, suitable adsorbing desiccant should be used to provide stable low vapor pressure conditions within the cup and, thus, to ensure the good accuracy of the measurement. In this work, different adsorbing desiccants mentioned in the ISO 12572 standard are tested for measurements performed on wood fiber insulation. For each experiment, relative humidity is monitored inside the dry cup. The results indicate that 0 %RH is not reached inside the dry cup and boundary condition is not always stable for highly permeable construction materials, depending on the adsorbing desiccants. The impact of these observation is evaluated on the determination of water vapor diffusion resistance factor and compared to other sources of uncertainties. Consequences on hygrothermal behavior of wooden frame building envelope are then evaluated.

KEYWORDS: water vapor permeability; moisture transfer, wood fiber insulation.

1. INTRODUCTION

La perméabilité à la vapeur d'eau est une des propriétés requises pour effectuer une simulation du comportement hygrothermique des enveloppes de bâtiments. Cette propriété est évaluée depuis les années 50 par la méthode de la coupelle. Ce test consiste à mesurer en régime permanent et sous conditions isothermes le flux de vapeur traversant un matériau scellé hermétiquement sur une coupelle contenant un dessiccant ou une solution saline saturée. La procédure expérimentale de ce test est détaillée dans la norme ISO 12572. Ce test est reproductible et répétable (Feng et al. 2015), indépendamment du personnel ou de la période d'essai. Malgré sa simplicité, des comparaisons inter-laboratoire ont toutefois montré des écarts sur la perméabilité à la vapeur de matériaux de construction, pouvant aller jusqu'à 400 % pour les plus perméables d'entre eux. Ces écarts se traduisent par des incertitudes sur la prédiction des champs d'humidité relative dans les parois et des différences avec des

mesures in-situ (Kêdowidé 2015, Lelievre et al. 2014). Aussi est-il fréquemment admis que ces méthodes de caractérisation en régime permanent ne sont pas adaptées à la problématique de la simulation du comportement hygrothermique dynamique d'enveloppe de bâtiment (Busser et al. 2016). Cela a conduit à l'émergence de méthodes complexes de caractérisation en régime dynamique, basées principalement sur des méthodes inverses (Rouchier et al. 2017, Challansonnex et al. 2018, Busser et al. 2018). Toutefois, une analyse plus fine du test de la coupelle peut conduire à nuancer ces affirmations.

Les principaux facteurs d'influence de ce test sont : la conception des dispositifs expérimentaux, la qualité de l'étanchéité, l'importance des résistances de surface ou la maîtrise des conditions ambiantes (pression barométrique, température, humidité relative). Néanmoins, tous n'ont pas la même importance selon que les matériaux étudiés sont étanches ou perméables. Pour ces derniers, leur résistance à la diffusion de vapeur est du même ordre de grandeur que celles de la couche d'air immobile dans la coupelle et de la couche limite à l'extérieur (Vololorinira et Perrin 2016). Si la norme ISO 12572 précise bien de limiter les effets de ces couches d'air, il est toutefois nécessaire de les prendre en compte dans l'analyse, bien qu'une évaluation précise des résistances ne soit toujours pas triviale (Talev et al. 2013). Pour les matériaux perméables, une autre incertitude réside dans le contrôle de l'humidité relative dans la coupelle. En effet, Pazera et Salonvaara (2009) ont mesuré une humidité non nulle au démarrage de l'expérience et une augmentation de 7 %rh sur 24h au sein d'une coupelle contenant du gel de silice lors du test d'un matériau perméable. Cet exemple souligne d'une part que le régime permanent n'est certainement pas atteint pour le test de la coupelle et d'autre part que l'utilisation d'une humidité relative nulle n'est pas appropriée lors de l'analyse. Des remarques similaires avaient déjà été formulées par Chang and Hutcheon (1953) dans les années 50.

Cette étude vise à étendre ces premières observations à d'autres dessiccants préconisés dans la norme ISO 12572. Les tests sont effectués sur un isolant en fibre de bois dont l'usage est rencontré dans les maisons à ossature bois ou en réhabilitation du patrimoine ancien, mais pour lequel la mesure de la perméabilité à la vapeur ne fait pas encore consensus (Vololorinira et al. 2014, Janssen 2018).

2. MATERIAU ET METHODE

Le matériau testé est un isolant hygroscopique en fibre de bois de 40 mm d'épais (Pavaflex Confort, fabriqué par Pavatex). Il présente une masse volumique de 50 kg.m^{-3} et une conductivité thermique déclarée de $0,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La fiche technique du produit indique également un facteur de résistance à la diffusion de vapeur égal à 2.

La perméabilité à la vapeur est mesurée selon la méthode de la coupelle conformément à la norme ISO 12572. Des échantillons de dimensions $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ sont testés. Initialement, ils sont conditionnés à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ and 50 %rh après séchage conformément à la norme EN 13171. Ils sont ensuite scellés avec un scotch aluminium étanche à des coupelles en polyéthylène de dimensions $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}^3$. Ce mode d'étanchéification a été vérifié sur un échantillon imperméable de PVC. Cinq dessiccants sont testés dans ce travail : du gel de silice âgé de 5 ans et régénéré plusieurs fois, du gel de silice neuf régénéré une fois, du chlorure de calcium CaCl_2 , du pentoxyde de phosphore P_2O_5 et une solution partiellement saturée d'hydroxyde de potassium KOH. Quel que soit le dessiccant, la couche d'air entre l'échantillon et le dessiccant est de $17 \pm 3 \text{ mm}$. La température et l'humidité relative au sein de cette couche d'air sont mesurées avec une précision de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et 2 %rh à l'aide de capteurs Hygropuce (Waranet, Auch, France). Ces capteurs sans fil de 6 mm d'épais et de 16 mm de diamètre

sont particulièrement adaptés pour ce type de mesure. Les coupelles sont placées dans une enceinte climatique (Mettler HPP 108, Schwabach, Allemagne) dont les consignes sont fixées à 23 °C et 50 %rh. La vitesse de l'air mesurée au-dessus des coupelles à l'aide d'un anémomètre à fil chaud est de $0,15 \pm 0,05 \text{ m.s}^{-1}$. Les coupelles sont pesées ponctuellement avec une précision de 0,01 g à l'aide d'une balance (Ohaus Adventurer Pro AV4102C, Pine Brook, USA). Conformément à l'annexe I de la norme 12572, le temps minimal entre deux pesées doit être de 8h pour obtenir une précision théorique de 2 % sur les résultats. Les mesures sont effectuées jusqu'à ce que le régime permanent soit atteint (défini lorsque le flux massique de 5 mesures consécutives ne diffère pas de $\pm 5 \%$ la valeur moyenne) ou jusqu'à ce que la masse de la coupelle ait augmenté de plus de 1,5 g / 25 ml de dessiccant, soit un gain de masse d'environ $2,5 \text{ kg.m}^{-2}$ pour ce dispositif expérimental.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les évolutions temporelles de la variation de masse des coupelles Δm , de la densité de flux massique g , de l'humidité relative HR et de la température T dans les coupelles sont présentées sur les Figures 1 et 2. Une courbe par dessiccant est représentée pour des raisons de lisibilité, mais la répétabilité des résultats a été vérifiée au moins une fois pour chaque dessiccant.

Le gel de silice étant fréquemment employés pour cet essai, l'analyse porte en premier lieu sur ce dessiccant et en particulier sur le gel de silice âgé (noté « Sil old »). Dès le commencement de l'expérience, Δm augmente de façon monotone, le seuil de $2,5 \text{ kg.m}^{-2}$ étant atteint après $19 \pm 1\text{j}$. Juste après le scellement de l'échantillon sur la coupelle, une humidité relative de 9 %rh est relevée dans la coupelle, alors qu'une valeur de 0 %rh est bien mesurée pour une coupelle scellée hermétiquement. L'humidité apportée par l'air n'est pas adsorbée instantanément et intégralement par le dessiccant. Simultanément, on note une augmentation significative de la température (pouvant aller jusqu'à 30 °C) due à l'adsorption de cette humidité. Après 24 h, HR a augmenté de 10 %rh, ce qui est légèrement supérieur aux observations de Pazera and Salonvaara (2009). Après 5 j, son augmentation est plus lente et la température a atteint son équilibre à 23 °C. Après 28 j, une valeur de 42 %rh est atteinte. Du fait de l'augmentation de HR , le gradient de pression de vapeur aux bornes de l'échantillon diminue : la densité de flux massique g est divisée par 2 au cours de l'expérience. De plus, le régime permanent n'est pas atteint puisque la densité de flux massique de 5 mesures consécutives diffère au minimum de $\pm 9 \%$ la valeur moyenne. Des observations très analogues sont observées pour le gel de silice neuf. Toutefois, en raison d'une meilleure capacité d'adsorption, le seuil de $2,5 \text{ kg.m}^{-2}$ étant atteint après $13 \pm 1\text{j}$ et HR est légèrement moindre. Cependant, cela n'est pas suffisant pour atteindre le régime permanent.

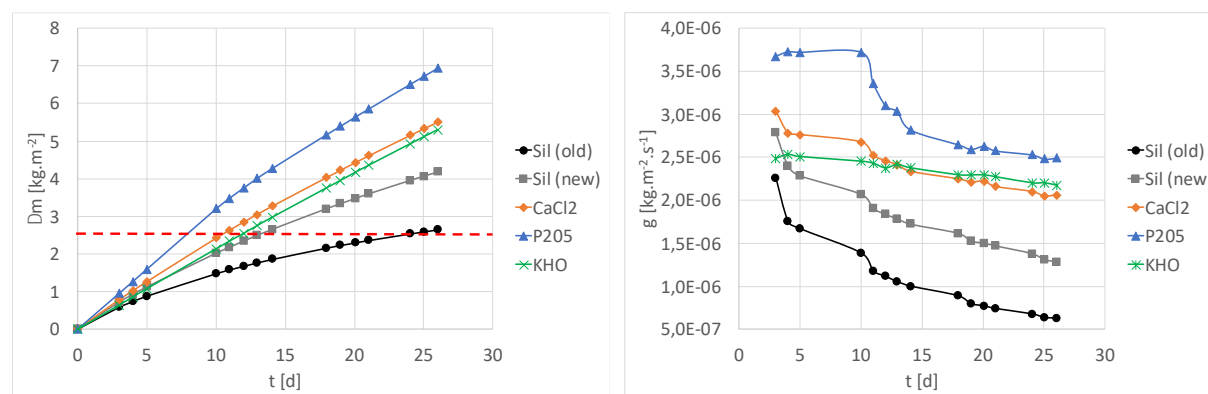


Figure 1 : Évolutions temporelles de la masse des coupelles (a) et de la densité de flux massique (b).

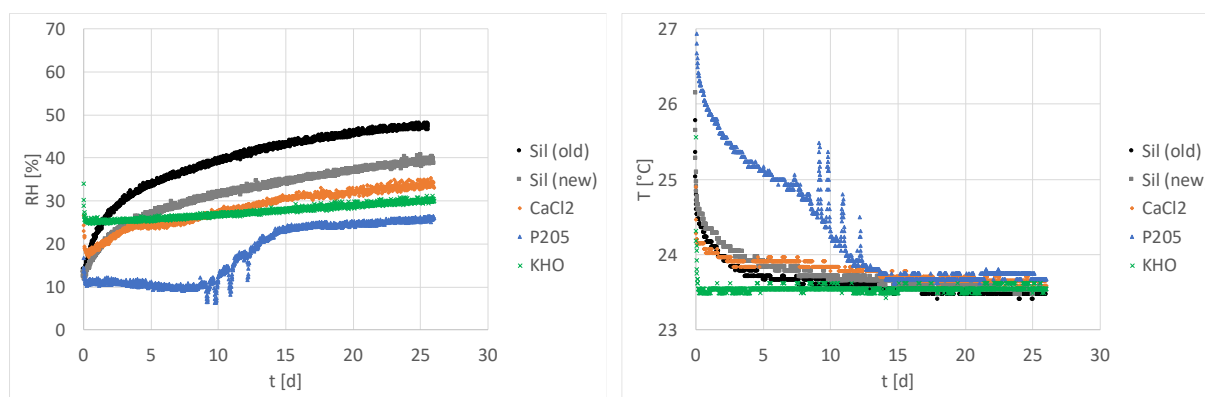


Figure 2 : Évolutions temporelles de l'humidité relative (a) et de la température (b) mesurées dans la coupelle.

Le chlorure de calcium CaCl_2 présente également un comportement similaire. Toutefois, la baisse plus limitée de la densité de flux massique permet de respecter le critère définissant le régime permanent. Notons qu'une croûte de 2 mm est observée en surface du dessiccant à l'issue de l'expérience. Le pentoxyde de phosphore P_2O_5 présente deux phases distinctes. Durant les dix premiers jours, la prise de masse est rapide, induisant une surélévation de température dans la coupelle ; néanmoins, l'humidité relative reste constante à environ 10 %rh, induisant une densité de flux massique constante. Ensuite, HR augmente jusque 23 %rh sur 5 cinq jours : la prise de masse ralentit, la densité de flux massique diminue et la température atteint l'équilibre. Notons que le dessiccant manipulé initialement sous forme de poudre est retrouvé sous forme liquide à l'issue de l'expérience et l'épaisseur de couche d'air est passée de 20 à 37 mm. Enfin, l'hydroxyde de potassium KOH présente une variation de masse quasiment linéaire et une densité de flux massique qui diminue légèrement : le régime permanent est évidemment atteint. La température dans la coupelle est stable et HR augmente de 25 à 30 %rh au cours de l'expérience. Ces niveaux plus importants que la valeur théorique de 8 %rh pour ce dessiccant tient dans le fait que la solution n'est pas complètement saturée.

Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur μ est calculé selon la méthode précisée dans la norme ISO 12572. L'humidité relative dans la coupelle est fixée soit à une valeur hypothétique de 0 %rh, soit d'après les mesures. L'influence des résistances de surface interne et externe est également évaluée. Les résultats calculés sur la période durant laquelle la densité de flux massique est la plus stable sont synthétisés en première partie du Tableau 1.

Méthode de calcul	Conditions		Sil. Gel (old)	Sil. Gel (new)	CaCl_2	P_2O_5	KOH
Norme ISO 12572	Régime permanent		Non	Non	Oui	Oui	Oui
	0 %rh	Pas de Rés. Surf.	9,45	4,06	3,18	2,66	2,85
		Rés. Surf.	8,85	3,54	2,51	1,99	2,23
	HR mes.	Pas de Rés. Surf.	0,87	1,37	1,2	1,41	1,35
Rés. Surf.		0,27	0,85	0,52	0,73	0,73	
Nouvelle méthode	Δp_v mes.	Pas de Rés. Surf.	1,77	1,9	2,65	2,62	6,24
		Rés. Surf.	1,17	1,37	1,98	1,95	5,62
	HR échantillon [%]		46,0	41,9	39,8	36	38,9

Tableau 1 : Facteur de résistance à la diffusion de vapeur calculé selon plusieurs approches.

Toutes les valeurs calculées de μ sont inférieures à 10, confirmant le caractère perméable de l'isolant en fibre de bois. Utiliser la mesure de l'humidité relative conduit à une baisse de μ comprise entre 1,25 et 8,5 et à une limitation de la dispersion des résultats. En guise de comparaison, les effets des résistances de surface sont moindres, induisant une diminution de $0,6 \pm 0,07$ de μ . Notons toutefois que certaines valeurs calculées sont inférieures à l'unité signifiant que la diffusion de la vapeur est plus rapide dans l'air que dans le matériau. Même si des concepts de « diffusion accélérée » peuvent être rencontrés dans la littérature (Ho et Webb 1998), ils ne s'appliquent pas aux matériaux fibreux et à faible teneur en eau. Nous suggérons plutôt que la méthodologie de calcul proposée dans la norme ISO 12572 n'est pas adaptée pour les matériaux perméables.

En contrepartie, une nouvelle méthode d'analyse est proposée. La Figure 3 présente les évolutions de la densité de flux massique en fonction de la différence de pression de vapeur mesurée aux bornes de l'échantillon. Pour l'ensemble des dessiccants, on note un comportement linéaire, la pente donnant directement la perméance. Les facteurs de résistance à la diffusion de vapeur μ calculés selon cette méthode sont également consignés dans le Tableau 1. Toutes les valeurs sont supérieures à l'unité. Pour les dessiccants solides, la perméance est calculée pour une grande plage de Δp_v : μ tend à diminuer légèrement avec l'humidité relative moyenne de l'échantillon, conformément aux observations de la littérature (Vololonirina et al. 2014). Pour la solution saline de KOH, la plage de variation de Δp_v est plus restreinte, induisant une plus grande incertitude sur l'évaluation de la pente, et donc de μ .

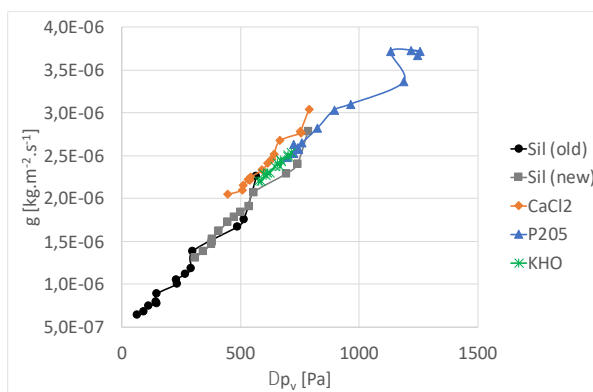


Figure 3 : Évolutions de la densité de flux massique en fonction de la différence de pression de vapeur mesurée aux bornes de l'échantillon.

4. CONSEQUENCES SUR LE COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE D'UNE MOB

Dans cette section, on s'intéresse aux conséquences de ces incertitudes sur la prédiction du comportement hygrothermique d'une enveloppe type d'une maison à ossature bois (MOB). La paroi est composée d'un bardage bois, d'une lame d'air ventilée de 25 mm, d'un pare-pluie ($S_d = 0,1m$), d'un panneau de contreventement en OSB ($S_d = 0,72m$), de 200 mm de laine de bois, d'un pare-vapeur et d'un parement intérieur en plâtre ($S_d = 0,11m$). Deux valeurs de facteur de résistance à la diffusion de vapeur sont retenues : 2 et 6 ($S_d = 0,4m$ ou $1,2m$). Elles sont mises en regard d'une étanchéité variable du pare-vapeur ($S_d = 20 m, 5m$ ou $2m$) qui peuvent être rencontrées en cas de perturbation dans sa continuité (Belleudy et al. 2019).

Un modèle de transferts couplés de chaleur et d'humidité est utilisé pour décrire la réponse en température et humidité de cette paroi (Bendouma et al. 2020). Les propriétés hygrothermiques des matériaux (sauf de la laine de bois) sont issues de la base de données de WUFI. La paroi, orientée au

Nord, est sujette aux conditions climatiques de Lorient à l'extérieur et à des conditions limites à l'intérieur définies selon la norme EN 15026 avec un fort taux d'occupation. Les conditions initiales sont fixées à 85 %rh dans toute la paroi. Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics sur une période de 3 ans.

Les évolutions des conditions hygrothermiques simulées à l'interface entre l'isolant et l'OSB sont mises en regard d'une courbe critique de développement de moisissure. Le cumul de dépassement de cette courbe est présenté sur la Figure 4a pour l'ensemble des configurations simulées. Les niveaux critiques sont largement dépassés la première année en raison des niveaux initiaux d'humidité, puis la paroi s'assèche progressivement les années suivantes. En présence d'un pare-vapeur étanche, la perméabilité à la vapeur de l'isolant n'influence que peu la réponse en température et humidité relative. En revanche, en présence d'un défaut de continuité du pare-vapeur, la part de la résistance à la diffusion de vapeur de l'isolant devient plus significative dans l'enveloppe ; ainsi, on note logiquement des dépassements de seuil critique les plus importants pour une faible résistance. Ces temps de dépassement sont traduits en un indice M de développement des moisissures défini par Hukka et Viitanen (1999). Ses évolutions sont tracées sur la Figure 4b. Tant que le pare-vapeur possède un S_d supérieur à 5m, l'indice M n'excède pas l'unité, correspond au stade de développement des moisissures à l'échelle microscopique. Cette situation ne présente pas de risque particulier. A l'inverse, en présence d'un pare-vapeur plus perméable, l'indice M tend à augmenter au fil des années, l'augmentation étant d'autant plus importante que la perméabilité de l'isolant est élevée. Ainsi, l'indice M peut atteindre une valeur de 3 pour laquelle plus de 10 % de la surface de l'élément est couverte de moisissure visible à l'œil nu. Même si ce développement se fait dans un espace confiné (entre l'OSB et l'isolant), il peut mettre en péril l'enveloppe, à minima à l'endroit où un défaut d'étanchéité est rencontré dans le pare-vapeur.

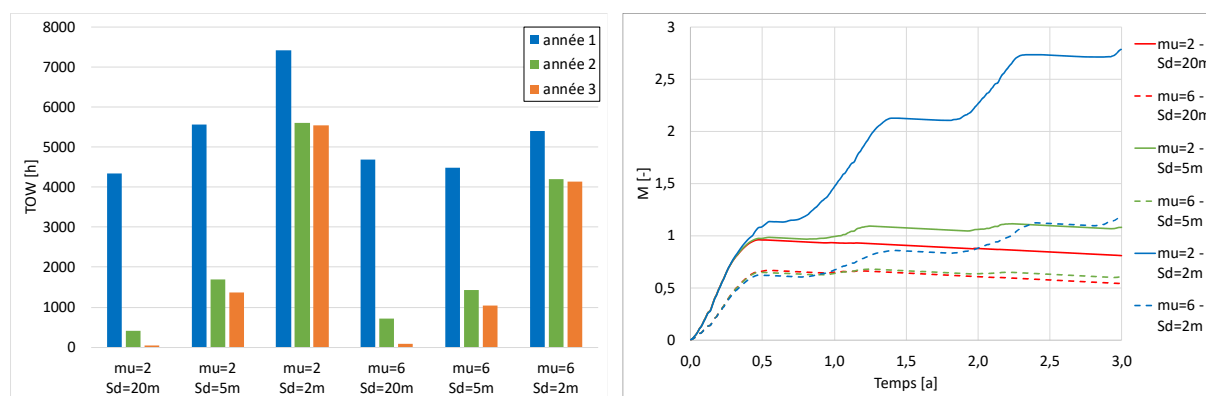


Figure 4 : Cumul de dépassement d'une courbe critique (a) et indice M de développement de moisissure (b) à l'interface entre l'isolant et l'OSB.

La Figure 5 présente les évolutions de la teneur en eau moyenne dans l'isolant. Celle-ci diminue durant les 6 premiers mois, puis atteint une valeur de pseudo-équilibre. La perméabilité à la vapeur de l'isolant influence peu cette valeur, au contraire de celle du pare-vapeur. Ainsi, une humidité plus importante est atteinte en présence d'un défaut d'étanchéité, ce qui va altérer la performance thermique de l'enveloppe.

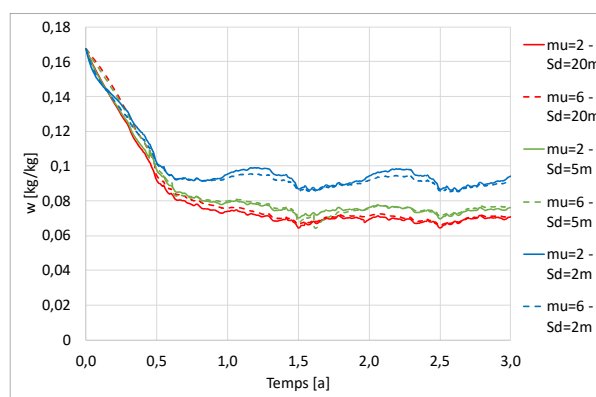


Figure 5 : Teneur en eau moyenne dans l'isolant.

5. CONCLUSIONS

Une campagne expérimentale de mesure de perméabilité à la vapeur d'eau d'un isolant en fibre de bois a été conduite pour différents dessiccants. Pour toutes les expériences, la température et l'humidité relative ont été mesurées dans la couche d'air comprise entre le dessiccant et l'échantillon. Plusieurs limites de l'analyse proposée dans la norme ISO 12572 ont été observées. Premièrement, les conditions sèches ne sont pas atteintes initialement pour ces essais, remettant en cause le fait d'utiliser une valeur théorique de 0 %hr dans la coupelle. Par ailleurs, la température peut être localement plus élevée de 10 °C que l'ambiance en raison du caractère exothermique de l'adsorption. Au cours de l'expérience, l'humidité transitant par l'échantillon est absorbée par le dessiccant qui voit sa capacité d'absorption progressivement diminuer : l'humidité relative dans la coupelle et le flux d'humidité ne sont pas constants et le régime permanent n'est pas nécessairement atteint. Toutes ces limites expérimentales peuvent conduire à estimer des facteurs de résistance à la diffusion de vapeur inférieurs à l'unité, ce qui n'est pas physiquement acceptable pour ce type de matériau et cette gamme d'humidité. A contrario, une nouvelle analyse en régime pseudo permanent est proposée permettant de s'affranchir de ces limites. Les perméabilités estimées présentent toutefois une large dispersion allant de 1,2 à 5,6. L'influence de cette dispersion a été évaluée sur le comportement hygrothermique d'une enveloppe d'une maison à ossature bois. Tant que la résistance hydrique de l'isolant est nettement inférieure à celles des autres matériaux de la paroi, aucun risque n'est à déplorer. En cas de défaut d'étanchéité dans le pare-vapeur, la perméabilité à la vapeur de l'isolant influence l'estimation d'un indice de développement des moisissures à l'interface entre l'isolant et l'OSB, des situations à risque pouvant être rencontrées.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Belleudy, Clément, Sylvain Boulet, Teddy Connan, Matthieu Cosnier, Jordan Gauvrit, Nicolas Place, Claude Pompeo, Sihem Tasca-Guernouti. 2019. Impact de la mise en œuvre du pare-vapeur : risque de pathologies liés à une perturbation dans la continuité de PV. Rapport PACTE "Hygro-Pv".
- Bendouma, Mathieu, Thibaut Colinart, Patrick Glouannec, Hervé Noël. 2019. "Laboratory study on hygrothermal behavior of three external thermal insulation systems". *Energy and Buildings* 210:109749. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109742>
- Busser, Thomas, Mickael Pailha, Amandine Piot, Monika Woloszyn. 2016. "Vers les simulations plus précises des transferts hygrothermiques dans les matériaux fortement hygroscopiques". In IBPSA France, Marne-la-Vallée.

- Busser, Thomas, Julien Berger, Amandine Piot, Mickael Pailha, Monika Woloszyn. 2018. “Dynamic experimental method for identification of hygric parameters of a hygroscopic material”. *Building and Environment* 131:197-209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.002>
- Challansonnex, Arnaud, Florian Pierre, Joel Casalinho, Pin Lv, Patrick Perré. 2018. “Mass diffusivity determination of various building materials based on inverse analysis of relative humidity evolution at the back face of a sample”. *Construction and Building Materials* 193:539-546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.219>
- Chang, S.C., N.B. HUTCHEON. 1953 “Performance of Desiccants in the Dry Pan Test for Water Vapor Permeance of Membranes”. *Canadian Journal of Technology* 31:175-192.
- Feng, Chi, Hans Janssen, Ya Feng, Qinglin Meng. 2015. “Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility”. *Building and Environment* 85:160-172. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.036>
- Ho, Clifford, Stephen Webb. 1998. “Review of porous media enhanced vapor-phase diffusion mechanisms, models, and data—does enhanced vapor-phase diffusion exist?”. *Journal of porous media* 1:71-92. DOI:10.1615/JPorMedia.v1.i1.60
- Hukka, Antti, Hannu Viitanen. 1999. “A mathematical model of mould growth on wooden material”. *Wood Science and Technology* 33:475-485. <https://doi.org/10.1007/s002260050131>
- Janssen, Hans. 2018. “A discussion of “Characterization of hygrothermal properties of wood-based products—Impact of moisture content and temperature””. *Construction and Building Materials* 185:39-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.018>
- Kédowidé, Yannick-Ariel. 2015. “Analyses expérimentales et numériques du comportement hygrothermique d’une paroi composée de matériaux fortement hygroscopiques”. Thèse de doctorat, Université de Savoie Mont Blanc. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01245319>
- Lelievre, Dylan, Thibaut Colinart, Patrick Glouannec. 2014. “Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses”. *Energy and Buildings* 84:617-627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>
- Pazera, Marcin, Mikael Salonvaara. 2009. “Examination of stability of boundary conditions in water vapor transmission tests”. *Journal of Building Physics* 33:45-64. <https://doi.org/10.1177/1744259109103228>
- Rouchier, Simon, Thomas Busser, Mickael Pailha, Amandine Piot, Monika Woloszyn. 2017. “Hygric characterization of wood fiber insulation under uncertainty with dynamic measurements and Markov Chain Monte-Carlo algorithm”. *Building and Environment* 114:129-139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.012>
- Talev, Goce, Bjørn Petter Jelle, Erling Naess, Arild Gustavsen, Jan Vincent Thue. 2013. “Measurement of the convective moisture transfer coefficient from porous building material surfaces applying a wind tunnel method”. *Journal of Building Physics* 37:103-121. <https://doi.org/10.1177/1744259112459262>
- Vololonirina, Oly, Marie Coutand, Bernard Perrin. 2014. “Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature”. *Construction and Building Materials* 63:223-233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014>
- Vololonirina, Oly, Bernard Perrin. 2016. “Inquiries into the measurement of vapour permeability of permeable materials”. *Construction and Building Materials* 102:338-348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.126>