

DIFFUSION DE LA VAPEUR D'EAU DANS UN MATERIAU FIBREUX EN CONDITION ISOTHERME

Fouzia ACHCHAQ, Laurent MARMORET, Hassen BEJI.

IUT-Département Génie Civil, Laboratoire des Technologies Innovantes

Avenue des Facultés 80025 Amiens

laurent.marmoret@u-picardie.fr

Résumé :

Des isolants de construction fibreux, de nature minérale et végétale, ont été soumis à des essais reprenant le principe de la méthode à la coupelle. Suivant leurs états initiaux (séchés ou en équilibre hydrothermique avec l'environnement extérieur), les cinétiques de diffusion enregistrées sont différentes. La perméabilité à la vapeur π , le coefficient de diffusion effective D_{ve} et la tortuosité τ en sont déterminés, puis comparés.

Mots clés : Matériaux fibreux, Diffusion, Perméabilité à la vapeur, Tortuosité.

1. INTRODUCTION

Les travaux expérimentaux concernant les milieux fibreux sont, à notre connaissance, très limités. Les rares études existantes touchent principalement aux aspects thermique et mécanique. Le comportement purement hydrique, en étant ainsi occulté, freine la compréhension de l'impact de l'eau sur un matériau fibreux et fausse l'estimation de l'influence d'un phénomène sur un autre lorsqu'ils sont couplés. Après avoir présenté les résultats expérimentaux obtenus par la méthode de la coupelle sur trois isolants thermiques $L1$, $L2$ et $L3$ de natures minérale et végétale, la teneur en eau massique ω , le taux d'humidité massique τ_m ainsi que la perméabilité à la vapeur π sont déterminés. L'intérêt des deux premiers paramètres est de connaître et comparer leurs cinétiques de diffusion tandis que le troisième permet d'apprécier les risques de condensation au sein des matériaux. La perméabilité à la vapeur π permet également de remonter au coefficient de diffusion effective D_{ve} nécessaire dans la compréhension des processus de transfert. En effet, sa variation met en évidence la modification de l'espace disponible à la diffusion de la vapeur d'eau d'où une estimation possible de la tortuosité τ , caractéristique structurale des matériaux.

2. MATERIELS ET METHODOLOGIE

2.1 Dispositif expérimental

La diffusion de la vapeur d'eau, en condition isotherme, a été observée par la méthode de la coupelle [1, 2, 3]. Pour faciliter l'analyse des résultats obtenus, le caractère unidimensionnel du phénomène physique est privilégié par le choix d'éprouvettes cylindriques et axisymétriques et par des gradients imposés dans le sens de l'axe. Une étanchéité, entre les parois du cylindre et du matériau, est assurée avec un gel de silicone. Une ambiance intérieure à la coupelle est imposée par une solution saline saturée tandis que l'autre est celle de l'environnement extérieur. La température T ainsi que l'humidité relative ϕ de l'ambiance extérieure sont suivies à l'aide de deux sondes hygrométrique et thermique. Le sel utilisé (NaCl) fixe l'humidité relative à l'intérieur de la coupelle à 75% et la température est

de 25°C. Le choix de ce sel s'est fait en fonction de l'humidité relative régnant dans la pièce d'expérimentation (35%). L'effet provoqué par les deux ambiances dans l'échantillon étant d'autant mieux observable que le gradient d'humidité est important.

2.2 Principe de mesure

Placé dans les conditions décrites précédemment, le matériau est traversé par un flux massique \vec{J}_v de vapeur du milieu 2 vers le milieu 1 si $p_{v2} > p_{v1}$. Le régime permanent est atteint lorsque le flux entrant par une face est égal à celui sortant par l'autre face. L'évolution de la masse de l'ensemble de la coupelle permet de tracer la courbe de teneur en eau massique ω ou du taux d'humidité massique τ_m en fonction du temps. La précision de la balance est 0,0001 g. Le taux d'humidité massique τ_m , rapportée à la masse du matériau dans l'ambiance extérieure $m_{35\%}$ [1], est défini, en pourcentage, comme étant :

$$\tau_m = \frac{m(t) - m_{35\%}}{m_{35\%}} \times 100 \quad (1)$$

tandis que la teneur en eau massique ω , rapportée à la masse sèche m_s , est telle que :

$$\omega = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

On en déduit le coefficient de perméabilité apparente à la vapeur d'eau π , « apparente » car le transfert interne n'a pas lieu uniquement sous forme vapeur en raison des îlots liquides potentiellement présents dans le matériau, notamment à l'intersection et le long des fibres [4,

5] :

$$\pi_{p_{v2}-p_{v1}} = \frac{J_v e}{p_{v2} - p_{v1}} \quad (3)$$

Par ailleurs, à l'aide de la première loi de Fick, un lien est établi entre la perméabilité π et le coefficient de diffusion effective D_{ve} tel que [5] :

$$D_{ve} = \frac{RT}{M} \pi \quad (4)$$

D_{ve} est dépendant de la géométrie du milieu considéré (effet Knudsen, évapo-condensation) et s'exprime dans le cas d'isolants fibreux d'après N. E. Wijesundera [6] :

$$D_{ve} = D_a \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (5)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Une première série rassemble des échantillons $L1$, $L2$ et $L3$ (cylindres de diamètre 74mm et d'épaisseur 30mm approximativement) séchés dans une étuve à 110°C jusqu'à masse constante et utilisés dès leur sortie de séchage. La deuxième série concerne deux échantillons $L1$ n'ayant subi aucun traitement hydrique ou thermique préalable.

3.1 À propos des échantillons séchés avant essai (1^{ère} série)

Les courbes de la figure 2 montrent l'évolution de la teneur en eau massique ω pour chacun des échantillons $L1$, $L2$ et $L3$ de la première série au cours du temps. Leurs allures sont identiques à celles décrites pour les matériaux poreux [2, 3, 5]. La méthode à la coupelle semble donc bien adaptée également aux matériaux fibreux de très forte porosité (> 90%).

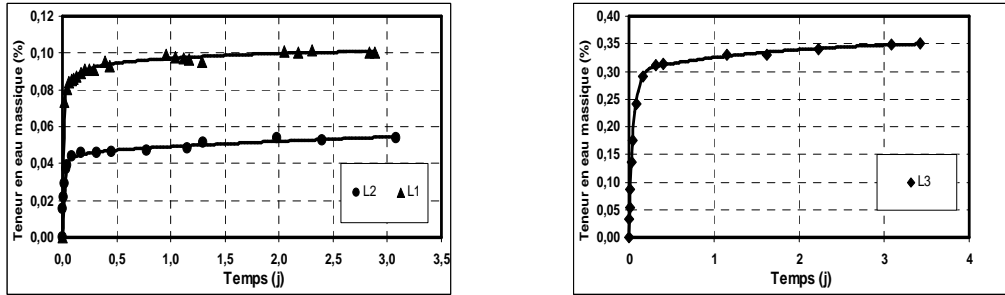


Figure 2 : Cinétiques de diffusion pour les trois isolants fibreux $L1$, $L2$, $L3$ initialement secs_ Coupelle NaCl (75%) / Ambiance extérieure (35%) à $T = 25^{\circ}\text{C}$

De manière générale, les teneurs en eau ω restent très faibles une fois le régime permanent entamé ($< 0,40\%$). Dans les conditions décrites, pour un même volume et en regard de leurs densités respectives d (Cf. Tableau 1), la laine $L3$ de nature végétale adsorbe plus de vapeur d'eau que les laines minérales $L1$ et $L2$. La fibre végétale, probablement sujette en outre au gonflement, est creuse (les liants sont négligés ici). Sa surface de contact avec les molécules de vapeur d'eau est supérieure à celle présentée par la fibre minérale pleine, favorisant ainsi une plus grande prise en eau. Dans le tableau 1 sont rassemblées les valeurs des coefficients π et D_{ve} calculés à partir des relations (3), (4) et (5) :

$\varphi_{\text{coupelle}} :$ 75 %	d (-)	$\pi_{p_{v2}-p_{v1}} \cdot 10^{-14}$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	$D_{ve} \cdot 10^{-09}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	τ (-)
$L3_{\text{sec initialement}}$	0,045	5,83	7,98	3047
$L1_{\text{sec initialement}}$	0,068	3,90	5,37	4627
$L2_{\text{sec initialement}}$	0,099	0,94	1,30	18708

Tableau 1 : Résultats obtenus pour les échantillons $L1$, $L2$ et $L3$.

Quelque soit la nature du matériau, un même ordre de grandeur est obtenu respectivement pour la perméabilité à la vapeur d'eau π ($10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) et le coefficient de diffusion effective D_{ve} ($10^{-09} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Néanmoins, pour les laines minérales, on peut noter une diminution de la valeur de ces deux paramètres avec l'augmentation de la densité d et par conséquent, une augmentation d'un facteur 4 de la tortuosité τ . La présence des fibres obstruant le passage des molécules d'eau est mis en évidence par le fait que $D_{ve} < D_{va}$. L'encombrement spatial rend le parcours de la vapeur plus tortueux et limite la capacité de diffusion. L'ordre de grandeur de π fourni par J. Berthier [1] pour les laines minérales est de $10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, soit une différence de l'ordre de 10^4 . Cependant, conclure sur cette différence nécessiterait des informations plus précises sur les matériaux utilisés (densité, porosité) et sur les conditions expérimentales de détermination des coefficients.

3.2 Influence des conditions initiales du matériau (2^{de} série)

Dans le but de travailler dans un état proche des conditions réelles d'utilisation, les matériaux ont été maintenus dans l'ambiance extérieure ($\varphi = 35\%$, $T = 25^{\circ}\text{C}$) de façon à être, avant le lancement de l'essai, à l'équilibre hydrothermique avec celle-ci [1]. La figure 3

présente l'évolution du taux d'humidité massique τ_m pour L1 au cours du temps. On note une moins bonne régularité dans la cinétique pour une durée d'expérimentation identique.

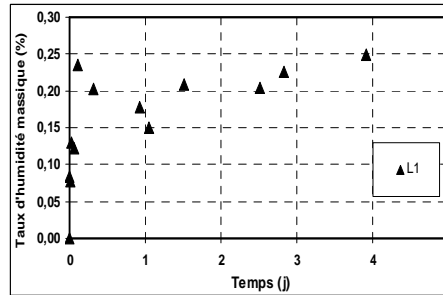


Figure 3 : Cinétique de diffusion pour l'isolant fibreux L1 maintenu initialement dans l'ambiance extérieure _ Coupelle NaCl (75%) / Ambiance extérieure (35%) à $T = 25^\circ\text{C}$

La tendance générale de la courbe est une augmentation du taux d'humidité massique τ_m au cours du temps. Il atteint une valeur de 0,24% au bout de trois jours. Si, a priori, cet échantillon a une prise en vapeur d'eau supérieure à l'échantillon de la première série, une comparaison semble difficile entre les résultats obtenus à partir du taux d'humidité massique τ_m (équation 1) et de la teneur en eau massique ω (équation 2). Cependant, il reste possible de comparer le comportement des isolants L1 à l'aide des paramètres rassemblés dans le tableau 2 suivant :

$\varphi_{\text{coupelle}} :$ 75 %	$d_{t=0mn}$ (-)	$d_{t=30mn}$ (-)	$\pi_{p_{v2}-p_{v1}} \cdot 10^{-14}$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	$D_{ve} \cdot 10^{-09}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	τ (-)
L1 non sec initialement	0,07026	0,07034	1,66	2,27	10939
L1 _{sec} initialement	0,06759	0,06812	3,90	5,37	4627

Tableau 2 : Résultats obtenus pour les échantillons L1.

Avant les essais, les valeurs des densités diffèrent d'environ 0,003. Cette variation, quoique faible, ne peut être attribuée à l'incertitude de mesure calculée à 10^{-5} (les dimensions des échantillons ont été mesurées avec un pied à coulisse mécanique). Deux hypothèses sont possibles. En se référant aux travaux effectués par J. Cid et al [7], l'explication serait la grande inhomogénéité structurale de ce type d'isolant. En se référant à [4], la cause résiderait dans la présence d'îlots liquides. Après quelques minutes d'essai, il apparaît que le choc thermique subit par l'isolant sec placé dès sa sortie de l'étuve (110°C) dans la coupelle (25°C) a entraîné une variation de sa densité de l'ordre de 0,78% contre 0,11% pour l'échantillon L1 non sec initialement. La quantité d'eau condensée accumulée en une demi-heure dans l'échantillon L1_{sec} initialement dépasserait donc celle contenue dans L1 non sec initialement, expliquant ainsi que son coefficient D_{ve} soit plus important de presque 60%. En effet, l'eau condensée favorise la diffusion par évaporation-condensation d'où le milieu plus accessible offert par L1_{sec} initialement à la vapeur d'eau [4].

4. CONCLUSION

Il a pu être réalisé combien il est, actuellement, toujours aussi difficile de comparer les résultats d'essais expérimentaux avec les données bibliographiques. Néanmoins, ce travail a validé, en condition isotherme, la méthode de la coupelle aux matériaux fibreux à très forte

porosité. Il a également permis de déterminer la perméabilité à la vapeur π et le coefficient de diffusion effective D_{ve} conduisant à la tortuosité τ . Il est apparu que les cinétiques de diffusion lorsque les échantillons sont séchés avant l'essai sont plus régulières que celles obtenues avec des échantillons initialement en équilibre hydrothermique avec leur environnement. Néanmoins, la détermination des coefficients cités précédemment montrent que nous restons dans les mêmes ordres de grandeurs, quelque soit la nature (minérale ou végétale) de nos isolants thermiques.

Nomenclature

e	épaisseur du matériau, m	Symboles grecs
m	masse, kg	$\pi_{p_{v2}-p_{v1}}$ perméabilité à la vapeur, $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
d	densité du matériau, (-)	φ humidité relative, %
D_{ve}	coefficient de diffusion effective, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	ϕ diamètre du matériau, m
D_{va}	diffusion de la vapeur dans l'air, ($\approx 2,56.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$)	τ tortuosité, (-)
J_v	densité de flux massique, $\text{kg}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	τ_m taux d'humidité massique, %
p_{vi}	pression de vapeur dans le milieu i , Pa	Indices
T	température, °C	l liquide

Références

- [1] J. Berthier, Diffusion de vapeur au travers des parois. Condensation, *Sciences du Bâtiment CSTB*, REEF Vol. II, pp 13- 18, 1980.
- [2] B. Kari, B. Perrin, J. C. Foures, Perméabilité à la vapeur d'eau de matériaux de construction : calcul numérique, *Materials and Structures*, 24, pp 227- 233, 1991.
- [3] A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny, G. Bastian, J. Godin, G. Villain, Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages. Détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton, *Rapport de synthèse*, pp 57- 62, 2000.
- [4] P. Crausse, J.P. Laurent, B. Perrin, Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux, Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment, 35, pp95- 106, 1996.
- [5] V. Baroghel-Bouny, Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. PartII: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction, *Cem. Concr. Res.*, doi:10.1016/j.cemconres.2006.11.017, 2006.
- [6] N. E. Wijesundera, M. N. A. Hawlader, Y. T. Tan, Water vapour diffusion and condensation in fibrous insulations, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 32, pp 1865- 1878, 1989.
- [7] J. Cid, J.F Alquier, P. Crausse, Study of moisture transfer in a deformable porous medium through attenuation of two different energy gamma rays, *Rev. Sci. Instrum.*, 63, pp 2057- 2064, 1991.