

Identification des paramètres hygriques par méthode inverse sur différentes plages de sollicitation dans le domaine hygroscopique

Julien ARNAUD¹, Florence COLLET¹, Marjorie BART¹, Thibaut COLINART²

1. Univ Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, 3 rue du Clos Courtel, 35704 Rennes.

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

RESUME Les bétons biosourcés répondent aux enjeux environnementaux et sont d'excellents régulateurs thermiques et hygriques. Pour généraliser leur utilisation, il faut développer des méthodes permettant de les caractériser sur de courts délais. Cet article propose d'approfondir la méthode inverse développée au LGCGM permettant d'identifier les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau. Celle-ci est basée sur le couplage du code interne TMC, modèle 1D de transfert de masse et de chaleur intégrant le phénomène d'hystérésis, et d'une méthode inverse d'estimation de paramètres. Afin d'identifier l'évolution de la perméabilité à la vapeur avec l'humidité, un essai hygrique dynamique a été réalisé en s'inspirant des essais MBV. Après stabilisation initiale, les sollicitations reposent sur une variation cyclique quotidienne de l'humidité relative sur trois séries de cycles d'une semaine chacune : (8h à 50%HR ; 16h à 35%HR) ; (8h à 65%HR ; 16h à 50%HR) ; (8h à 80%HR ; 16h à 65%HR). L'étude porte sur six demi-briques de béton de chanvre 30*30*10 cm. Trois d'entre elles sont pesées et les trois autres instrumentées. Les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur identifiées sont ensuite utilisées en entrée du code TMC. La comparaison de la réponse hygrique numérique à la réponse expérimentale montre la pertinence des outils développés.

Mots-clés : perméabilité à la vapeur d'eau, méthode inverse, isotherme de sorption, béton de chanvre, essai hygrique dynamique

Modalité de présentation : Présentation orale

I. INTRODUCTION

Pour répondre aux enjeux de développement durable et de décarbonation de nos modes constructifs, les matériaux biosourcés sont de plus en plus étudiés pour massifier leurs utilisations. Le béton de chanvre est l'un des plus étudiés et utilisés en France car la filière chanvre, organisée autour de syndicats, a franchi une étape importante avec l'élaboration de règles professionnelles. C'est un matériau à porosité élevée et de nature cellulosique, ce qui lui permet d'avoir une conductivité thermique peu élevée comprise entre 0,09 et 0,18 W/m.K (Collet and Pretot, 2014; Gourlay et al., 2017; Seng et al., 2019a; Jami et al., 2019) et d'avoir des propriétés hygriques spécifiques : sa perméabilité à la vapeur d'eau est élevée et sa capacité à adsorber/désorber l'humidité ambiante permet de réguler naturellement l'humidité dans la pièce et donc de participer au confort hygrothermique des usagers (Samri, 2008; Zhang et al., 2012; Jami et al., 2019; Collet et al., 2025). Parmi les propriétés hygriques, les isothermes de sorption caractérisent le stockage et la

perméabilité à la vapeur d'eau le transfert. Ces caractéristiques hygroscopiques doivent être déterminées pour pouvoir valoriser les qualités hygriques du béton de chanvre et massifier son utilisation.

Les essais de caractérisation de ces propriétés hygriques sont chronophages. La perméabilité à la vapeur d'eau peut être mesurée via la méthode de la coupelle sèche ou humide (EN ISO 12572 : 2016) en un à deux mois (Walker and Pavía, 2014). Par ailleurs, cet essai peut s'avérer difficile à exploiter (Colinart and Magniont, 2025). Les isothermes de sorption peuvent être mesurées par méthode discontinue selon la norme ISO 12571. Cette méthode consiste à mesurer en condition isotherme et pour des humidités relatives données la masse d'échantillons jusqu'à stabilisation. La mesure peut donc prendre des mois : elle a duré un an et neuf mois pour (Chamoin, 2014) avec neuf paliers d'humidité pour caractériser des échantillons de béton de chanvre préfabriqué ; neuf mois pour (Mazhoud, 2017) pour cinq paliers d'humidité en identifiant uniquement la courbe d'absorption pour caractériser des bétons de chanvre avec liant chaux ou argile-chaux. Cette mesure peut être automatisée sur des équipements de type DVS, mais qui requière des échantillons de quelques milligrammes, ce qui pose la question de la représentativité des échantillons testés dans le cas des bétons biosourcés.

Pour permettre l'identification des propriétés hygriques des matériaux de construction plus rapidement, des recherches sont menées sur l'utilisation de méthodes inverses (Dubois et al., 2014; Busser et al., 2018; Vereecken et al., 2018; Zaknoune, 2011).

(Dubois et al., 2014) se basent sur les résultats expérimentaux d'un essai MBV réalisé selon le protocole Nordtest (Rode et al., 2005) pour identifier les isothermes de sorption de deux mortiers à base d'argile. La perméabilité à la vapeur d'eau est identifiée constante. Cette méthode inverse est basée sur la technique bayésienne MCMC (Monte Carlo Markov Chains) et l'algorithme DREAM (Differential Evolution Adaptive Metropolis). (Busser et al., 2018) se basent sur les résultats expérimentaux d'un essai dynamique dans deux chambres climatiques avec une plage d'humidité relative testée allant de 2% à 75% pour identifier les paramètres hygriques de matériaux à base de fibre de bois. Les paramètres identifiés sont les coefficients des fonctions polynomiales décrivant l'isotherme de sorption et de perméabilité à la vapeur d'eau, en se basant sur la méthode des moindres carrés et l'algorithme Trust Region. (Vereecken et al., 2018) se basent sur les résultats numériques d'un essai dynamique fictif passant par des paliers de 24h à 12%/33%/54%/75%/85% d'humidité relative pour identifier les paramètres hygriques de silicate de calcium. Deux algorithmes d'intelligence artificielle sont utilisés : l'optimiseur Particle Swarm et l'optimiseur Grey Wolf. Les paramètres identifiés sont les coefficients du modèle de Van Genuchten (1980) et une résistance à la vapeur en fonction de l'humidité relative. (Zaknoune, 2011) se base sur un essai de séchage effectué 48h après la mise en œuvre d'un échantillon en béton de chanvre à une température de 29,2°C pour estimer les coefficients de diffusion des phases liquide et vapeur dus aux gradients de la température ou teneur en eau. Les échantillons caractérisés sont en béton cellulaire et béton de chanvre. L'algorithme de programmation quadratique séquentielle SQP est utilisé.

Récemment, (Khaled, 2023) a développé au sein du LGCGM une approche couplant le code TMC (Moissette and Bart, 2009), modèle numérique 1D de transfert de masse et de chaleur avec intégration du phénomène d'hystérésis (Aït Oumeziane et al., 2014) et d'une méthode d'estimation

(Méthode des moindres carrés avec le solveur LSQCURVEFIT de Matlab). Cette méthode permet d'identifier une valeur constante de perméabilité à la vapeur d'eau et les isothermes de sorption en considérant ou non l'hystérésis. Elle a été appliquée sur les résultats expérimentaux d'un essai MBV réalisé selon le protocole Nordtest (Rode et al., 2005) pour identifier l'isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau, considérée constante, sur du béton de chanvre (Benkhalla et al., 2024).

La perméabilité à la vapeur d'eau, étant dépendante de la teneur en eau (Collet et al., 2013; Seng et al., 2019), l'objectif est désormais d'explorer l'évolution de la perméabilité à la vapeur le long du domaine hygroscopique en vue de pouvoir ensuite simuler plus précisément la réponse hygrique du matériau aux sollicitations. Cet article présente l'approche développée pour estimer la perméabilité à la vapeur sur une gamme d'humidité plus large à partir d'un essai spécifique inspiré de l'essai MBV.

II. METHODES & MATERIAUX

A. Méthode expérimentale et échantillons

Afin d'explorer une gamme d'humidité plus large que lors de l'essai MBV considéré dans (Benkhalla et al., 2024a) et d'identifier l'évolution de la perméabilité à la vapeur le long du domaine hygroscopique, un nouvel essai hygrique dynamique (EHD) est réalisé allant de 35 %HR à 80 %HR. Après séchage à 60 °C, les échantillons sont stabilisés à 23,1 °C et 34,3 %HR puis soumis à différents cycles d'humidité pendant 5 jours, entrecoupés de paliers pendant 2 jours. Les consignes imposées sont représentées sur la [FIGURE 1](#) et un capteur SHT35 mesure les valeurs de température et d'humidité relative dans la chambre climatique tout au long de l'essai avec un pas de temps de 3 min. La méthode de préparation des échantillons est inspirée du protocole Nordtest pour l'essai MBV. Les échantillons ont été étanchés sur toutes leurs faces, sauf une, et placés verticalement dans une armoire climatique, dans laquelle les conditions de température et d'humidité sont contrôlées. La vitesse mesurée au voisinage des échantillons avec un anémomètre à fil chaud est de l'ordre de 0,1 m/s conformément aux recommandations du protocole Nordtest.

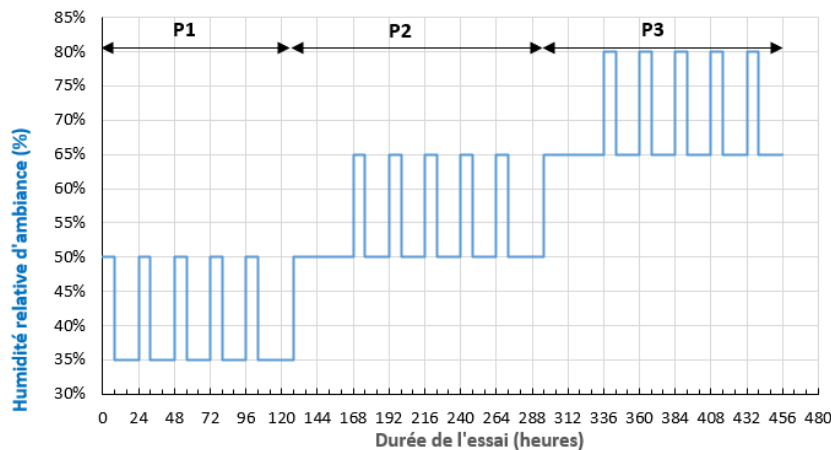
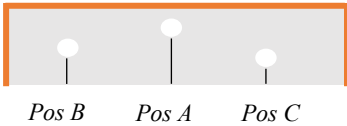


FIGURE 1 - Cycles d'humidité pour l'EHD

Le matériau considéré dans cette étude correspond à des briques MULTICHANVRE. Ce béton de chanvre est composé de chènevotte, de ciment naturel prompt Vicat et d'eau. Selon le fabricant, la masse volumique apparente est de 360 kg/m^3 . Ce matériau a été caractérisé dans (Benkhalla et al., 2024a). Six échantillons, correspondant à des demi-briques, sont utilisés dans cette étude. Le **TABLEAU 1** recense leurs caractéristiques physiques et leur utilisation. Les échantillons présentent une masse volumique apparente sèche homogène avec une valeur moyenne de $289,4 \text{ kg/m}^3$ et un écart-type de $9,7 \text{ kg/m}^3$. La masse volumique réelle mesurée précédemment est de $1685,43 \text{ kg/m}^3$, conduisant à des porosités de $83 \pm 0,58\%$.

Parmi les six échantillons, trois font l'objet d'un suivi massique et trois autres sont instrumentés. Le suivi massique comprend cinq pesées au cours de la phase d'adsorption, trois au cours de la phase de désorption, et deux par jour lors des paliers intermédiaires. Les pesées sont réalisées hors de l'armoire climatique avec une balance Sartorius LP 8200 S de précision totale 0.04 g . L'instrumentation est faite avec des capteurs de température et d'humidité SHT35 (précision de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ et $\pm 1,5 \text{ \%HR}$) répartis dans l'épaisseur du béton de chanvre, l'acquisition est faite avec un pas de temps de 3 min .

TABLEAU 1 – Caractéristiques des échantillons

N° échantillons	2	4	6	5	7	8
Dimensions [cm^3]	29,9*29,5*10	29,9*29,6*9,9	30*29,6*10,1	30*29,9*10,2	30*29,5*10	30,1*29,6*10,2
$\rho_{\text{app}} \text{ sèche} [\text{kg/m}^3]$	305,1	280,0	285,6	288,2	296,6	281,1
$n_0 [\%]$	81,9	83,4	83,1	82,9	82,4	83,3
$w_{\text{sat}} [\text{kg/m}^3]$ $= n_0 * \rho_{\text{eau}}$	817	832	829	827	822	832
pesé / instrumenté	instrumentés			pesés		
Position des capteurs SHT35 (distance au bord sollicité)	A : 7,55 B : 5,05 C : 2,65	A : 6,78 B : 4,98 C : 1,98	A : 7,56 B : 5,16 C : 2,66			

B. Modèle

Le code TMC est basé sur le modèle de Kunzel (Kunzel, 1995) qui utilise la température T et l'humidité relative φ comme variables d'état. Les équations de transfert de chaleur et d'humidité sont les suivantes :

$$\frac{dW}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left[\delta_p \frac{\partial(\varphi P_{v,sat})}{\partial x} \right] \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{sec} \cdot c \cdot T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + L_v \frac{\partial}{\partial x} \left[\left[\delta_p \frac{\partial(\varphi P_{v,sat})}{\partial x} \right] \right] \quad (2)$$

Avec, W [kg/m³] la teneur en eau volumique, D_{φ} [kg/(m.s)] le coefficient de conduction liquide, δ_p [kg/(m.s.Pa)] la perméabilité à la vapeur, $p_{v,sat}$ [Pa] la pression de vapeur saturante, ρ_{sec} [kg/m³] la masse volumique au point sec, c [J/(kg.K)] la capacité thermique, λ [W/(m.K)] la conductivité thermique, L_v [J/kg] la chaleur latente (L_v 2,26 x 10⁶ J/kg). Pour le béton de chanvre, la conductivité thermique sec est de 0,1 W/m.K (Barbhuiya and Bhusan Das, 2022) et la chaleur massique sec est de 1250 J/kg.K (Seng et al., 2019). Le modèle de Van Genuchten est utilisé pour modéliser l'isotherme de sorption (Van Genuchten, 1980).

$$w_{(\varphi)} = w_{sat} * \left(\left| \alpha \frac{R * T}{M_l * g} * Ln_{(\varphi)} \right|^{\eta} \right)^{-\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)} \quad (3)$$

Où w_{sat} [kg/m³] représente la teneur en eau à saturation. R [8,314 J/(mol.K)] représente la constante universelle des gaz parfaits. T [296,17 K] représente la température moyenne de l'ambiance expérimentale supposée constante. g [9,81 m/s²] représente l'accélération de la pesanteur. M_l [0,018 kg/mol] représente la masse molaire d'une molécule H₂O. α et η sont des paramètres d'ajustement. Le modèle est résolu pour une géométrie 1D en négligeant les transferts liquides ($D_{\varphi} = 0$ kg/(m.s)). Sur la face ouverte, des échanges convectifs thermiques et massiques sont considérés. Le coefficient d'échange thermique est calculé avec la relation de Rode (Rode et al., 2005) à 2,256 W/m².K et le coefficient d'échange massique est calculé avec la relation de Lewis à 1,4925 E10⁻⁸ kg/Pa.m².s. Sur la face étanchéifiée, seuls des échanges convectifs thermiques sont considérés. Les températures et humidités relatives mesurées sont prises pour calculer les conditions aux limites ainsi que les conditions initiales.

C. Méthode d'identification et démarche d'exploitation

La méthode inverse développée au LGCGM permet d'identifier une valeur constante de perméabilité à la vapeur d'eau et l'isotherme de sorption d'un échantillon ayant suivi un essai hygrique dynamique. L'algorithme d'optimisation utilisé est la méthode Trust-Region. Le solveur Lsqcurvefit de MATLAB est utilisé pour minimiser les écarts entre les données expérimentales et les résultats numériques de TMC en faisant varier les paramètres δ_p perméabilité à la vapeur d'eau, α et η coefficients du modèle de Van Genuchten.

L'identification a été faite dans un premier temps avec uniquement les données de la première période (P1) (5 cycles de 35-50%), puis des périodes (P1 + P2) (5 cycles 35-50 %RH + 1 palier 50 %RH sur 2 jours + 5 cycles 56-65 %RH- et enfin sur la totalité de l'essai (P1 + P2 + P3). Dans un second temps, l'isotherme de sorption la plus représentative de l'échantillon, celle identifiée sur la totalité de l'essai et donc avec la plus grande gamme d'humidité, a été conservée pour permettre d'identifier seulement la perméabilité à la vapeur d'eau pour les périodes P1 et P1+P2.

Les différents jeux de paramètres identifiés sont ensuite utilisés en données d'entrées dans TMC. Une comparaison des pressions de vapeur simulées et mesurées aux différentes positions est proposée pour valider la qualité de l'identification. Les indicateurs de qualité R^2 , RMSE et NRMSE sont quantifiés.

III. RESULTATS

A. Essai hygrique dynamique et suivi massique

La **FIGURE 2** montre l'évolution de l'humidité relative dans l'armoire climatique et de l'accumulation de la masse d'eau par unité de surface des 3 échantillons pesés lors de l'essai EHD. Les consignes de HR sont bien respectées, avec des écarts moyens par rapport à la consigne n'excédant pas 2 %HR sur tout l'essai. Les pics et chutes d'humidité correspondent aux temps de mesure, la porte de l'armoire devant être ouverte ponctuellement pour peser les trois échantillons. Les cinétiques d'accumulation de masse d'eau par unité de surface des échantillons sont comparables tout au long de l'essai. La masse des échantillons augmente durant les phases d'adsorption et diminue durant les phases de désorption. Même si la masse d'eau initiale de l'échantillon 7 est plus importante que les deux autres échantillons, les variations sont identiques pour tous les échantillons, soulignant la bonne reproductibilité des expériences. À l'issue de la période P1, le faisceau d'accumulation est stabilisé. Lors de la période P2, il tend vers la stabilisation. Lors de la période P3, le faisceau suit toujours une tendance croissante.

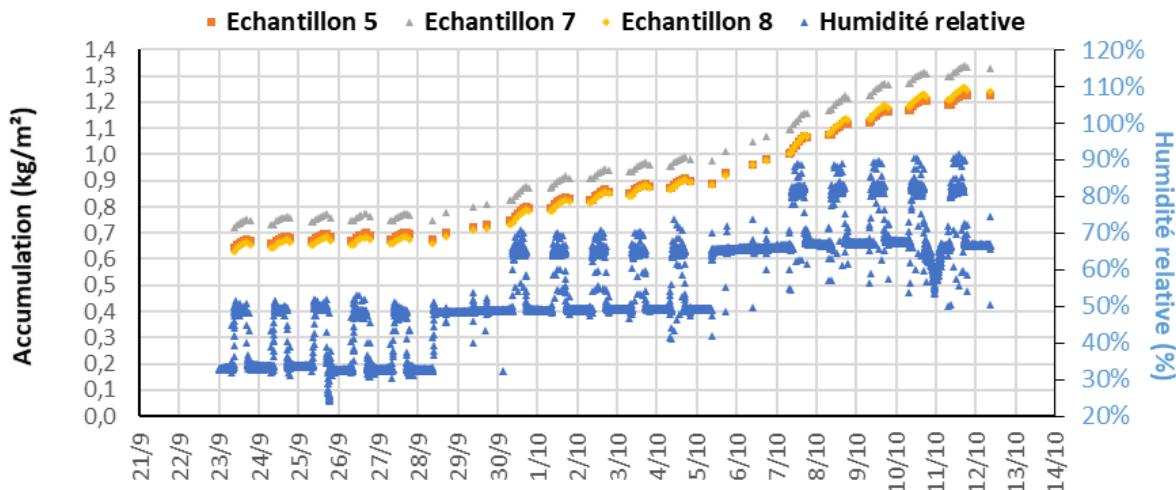


FIGURE 2 - Masse d'eau accumulée par unité de surface des trois échantillons et de l'humidité d'ambiance

B. Identification des paramètres hygriques

Les identifications réalisées sur les trois périodes permettent de très bons ajustements des cinétiques numériques aux expérimentales comme le montrent les indicateurs dans le [TABLEAU 2](#) avec des R^2 supérieurs à 0,9931 et des NRMSE inférieurs à 0,41%.

TABLEAU 2 - Indicateurs quantitatifs R^2 , RMSE et NRMSE calculés pour chaque estimation.

Période considérée et indicateurs	Echantillon 5	Echantillon 7	Echantillon 8
$P1 - R^2$	0,9931	0,9969	0,9965
$P1 - RMSE$	1,63E-03	1,03E-03	1,11E-03
$P1 - NRMSE$	0,24%	0,14%	0,17%
$P1 + P2 - R^2$	0,9947	0,9973	0,9966
$P1 + P2 - RMSE$	2,12E-03	2,53E-03	2,72E-03
$P1 + P2 - NRMSE$	0,31%	0,34%	0,41%
$P1 + P2 + P3 - R^2$	0,9942	0,9964	0,9954
$P1 + P2 + P3 - RMSE$	2,47E-03	2,44E-03	2,62E-03
$P1 + P2 + P3 - NRMSE$	0,36%	0,32%	0,40%

A titre d'exemple, la [FIGURE 3](#) montre les résultats expérimentaux et les cinétiques numériques ajustées dans le cadre de l'identification des paramètres sur les 3 périodes pour les échantillons 5, 7 et 8.

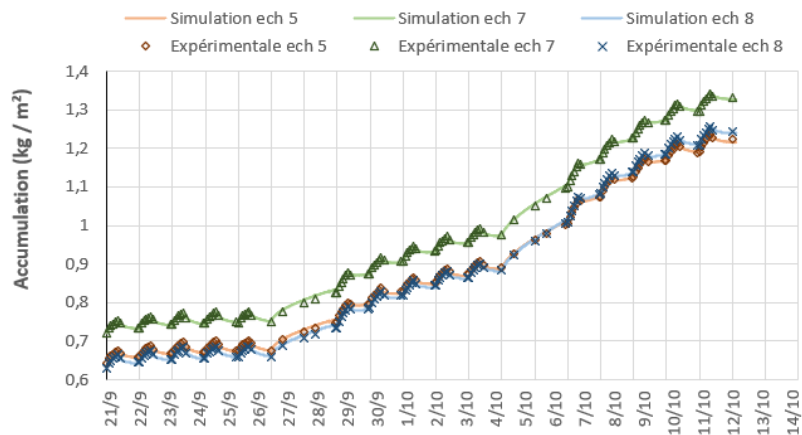


FIGURE 3 - Comparaison de l'accumulation expérimentale et simulée, échantillons 5, 7 et 8

Pour les trois échantillons, les résultats de l'identification des isothermes de sorption sont donnés dans le [TABLEAU 3](#) et la [FIGURE 4](#). Les résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau identifiés sont donnés dans la [FIGURE 5](#).

TABLEAU 3 - Paramètres de Van Genuchten identifiés pour les échantillons 5, 7 et 8

	Echantillon 5	Echantillon 7	Echantillon 8
α avec $P1$	0,0211	0,1491	0,0829
α avec $P1 + P2$	0,0383	0,0301	0,0234
α avec $1P + P1 + P2 + P3$	0,0204	0,0114	0,0001
η avec $P1$	1,8433	1,6143	1,6853
η avec $P1 + P2$	1,7646	1,7762	1,8345
η avec $1P + P1 + P2 + P3$	1,8484	1,9230	2,0001

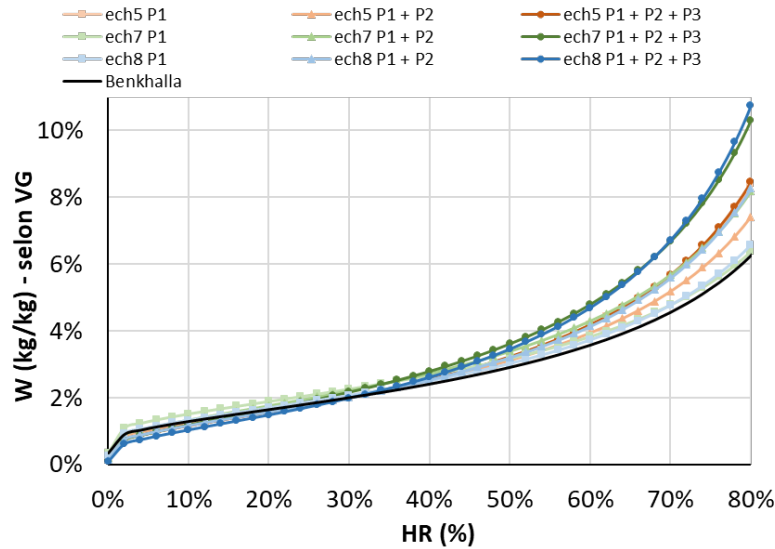


FIGURE 4 - Isothermes de sorption identifiées pour les échantillons 5, 7 et 8 et isotherme d’adsorption pour (Benkhalla, 2024)

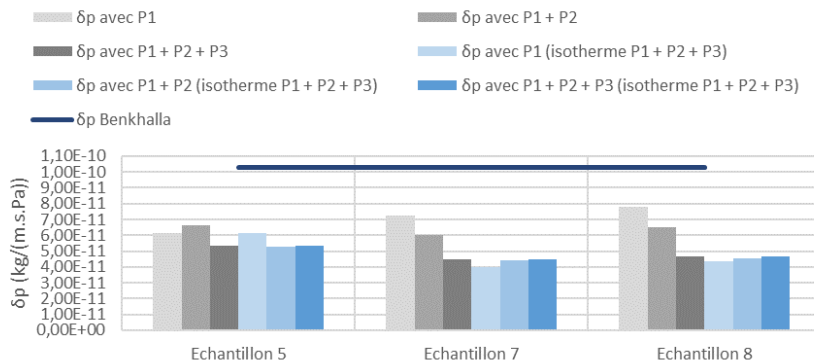


FIGURE 5 - Perméabilité à la vapeur d'eau identifiées pour les échantillons 5, 7 et 8 et (Benkhalla, 2024)

Les isothermes identifiées sont comparables pour les différents échantillons jusqu’à une humidité relative de 50% environ, au-delà, celle de l’échantillon 5 diffère légèrement des autres. Lorsque la période d’identification utilisée atteint les plus hautes humidités (P1 + P2 + P3), les isothermes estimées montrent une accumulation d’eau plus forte à mesure que l’humidité augmente. Les isothermes de sorption des différents échantillons sont identifiées sans prendre en compte le phénomène d’hystérésis. Elles sont comparées à l’isotherme d’adsorption identifiée dans (Benkhalla et al., 2024b). Les isothermes identifiées ici montrent une accumulation d’eau plus forte à forte humidité que l’isotherme d’adsorption de (Benkhalla et al., 2024b).

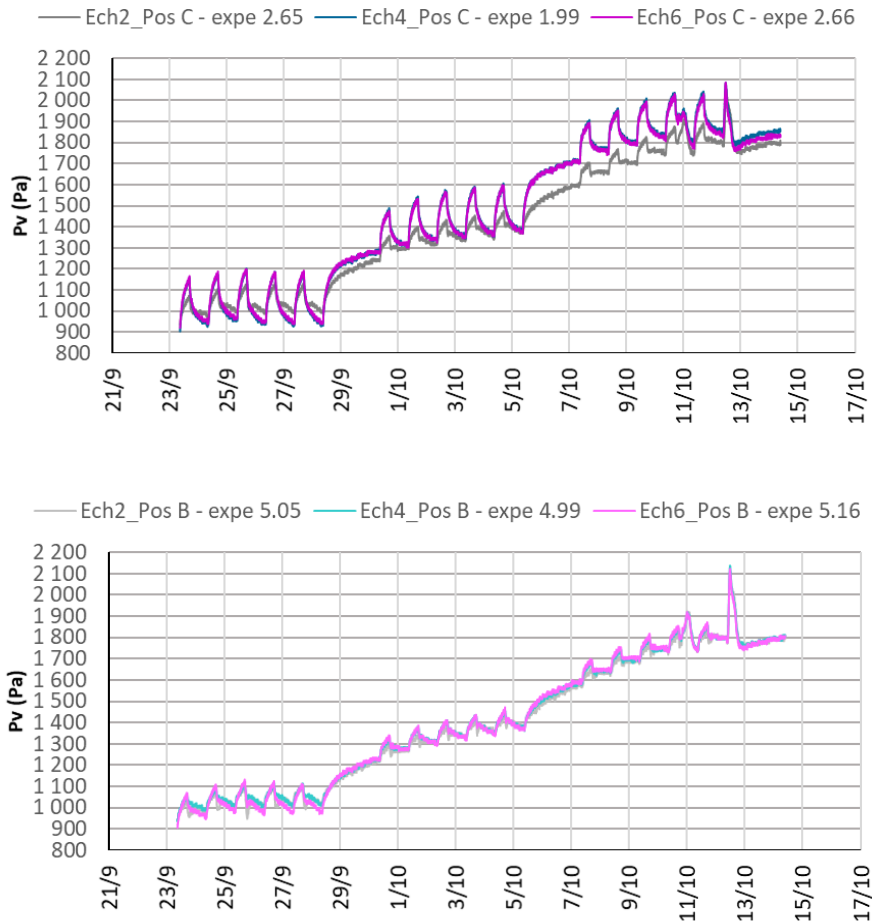
Lorsque l’identification est faite par période, à la fois pour l’isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur, la **FIGURE 5** montre que la perméabilité diminue à mesure que l’humidité de l’essai augmente. Ces résultats sont contraires à ceux de la littérature qui montrent que la perméabilité à la vapeur d’eau augmente en fonction de la teneur en eau (Collet et al., 2013; Seng et al., 2019b). Il

s'agit peut-être d'un effet de compensation entre l'isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur lors de l'estimation.

Ainsi, pour compléter l'analyse, l'identification est ensuite faite en conservant l'isotherme identifiée sur P1 + P2 + P3 pour estimer uniquement la perméabilité à la vapeur d'eau. En suivant cette approche (FIGURE 5), la perméabilité identifiée est constante avec l'humidité pour les trois échantillons. En revanche, l'ajustement sur les variations globales de la masse est légèrement moins bon. Les valeurs identifiées conduisent à des valeurs de résistance à la diffusion de vapeur, entre 3,2 et 4,9, comparable à la littérature selon (Tran Le, 2010; Collet et al., 2013; Lelievre et al., 2014). La perméabilité à la vapeur identifiée par (Benkhalla et al., 2024a) est supérieure à celles identifiées ici.

C. Comparaison avec les humidités relatives mesurées

Les cinétiques de pression de vapeur d'eau expérimentales ont été calculées à partir des températures et humidités relatives mesurées par les sondes SHT35 (FIGURE 6)



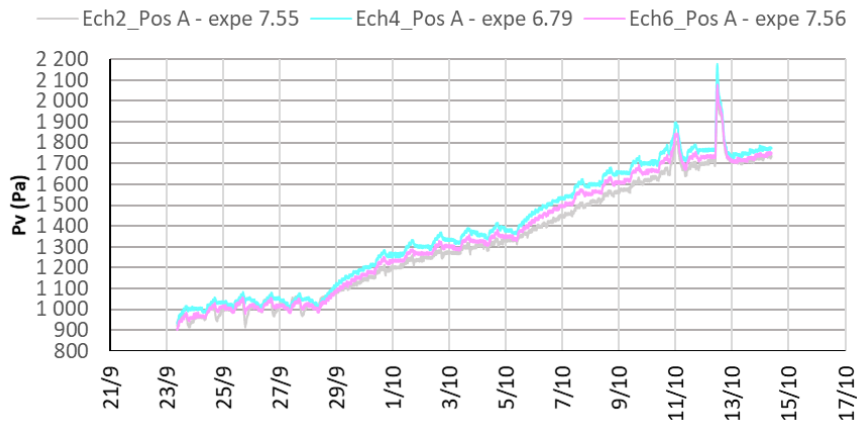


FIGURE 6 - Pression de vapeur aux différentes positions - résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sur les trois échantillons sont proches pour les positions A et B. A la position C, les résultats de l'échantillon 2 montre une pression de vapeur inférieure aux deux autres. De plus, par rapport aux autres échantillons, la répartition des capteurs dans l'échantillon 4 est moins régulière sur son épaisseur. L'échantillon 6 sera donc utilisé pour faire la comparaison avec les données simulées.

Comme pour les cinétiques de masses, les faisceaux se stabilisent lors de la 1P, tendent à se stabiliser à 1P + 2P, et continuent à croître en fin d'essai. La position C, la plus sollicitée car la plus proche de la surface d'échange, montre les amplitudes les plus importantes de l'ordre de 220 à 250 Pa. Enfin, le signal se propage jusqu'à 7,5 cm de profondeur avec des amplitudes de l'ordre de 60 à 80 Pa bien que les cycles soient courts.

Les pressions de vapeur simulées avec les paramètres hygriques identifiés sur P1 + P2 + P3 sont comparées avec les données expérimentales (FIGURE 7). Les cinétiques numériques sont synchronisées avec les cinétiques expérimentales mais avec des amplitudes réduites. Le coefficient de détermination R^2 a une valeur supérieure à 0,98 confirme cette concordance pour les simulations sur P1 + P2 + P3 (TABLEAU 4). L'indicateur RMSE montre que l'écart entre les cinétiques numériques et expérimentales augmente au cours de l'essai, avec une sous-estimation numérique de la pression de vapeur.

TABLEAU 4 - Indicateurs qualitatifs R^2 et RMSE

		Id ech 5 - Expé ech 6			Id ech 7 - Expé ech 6			Id ech 8 - Expé ech 6		
		Position A	Position B	Position C	Position A	Position B	Position C	Position A	Position B	Position C
R^2	1P	0,811	0,824	0,906	0,753	0,830	0,879	0,767	0,824	0,891
	1P + 2P	0,982	0,984	0,969	0,976	0,981	0,966	0,977	0,982	0,968
	1P + 1P + 2P + 3P	0,993	0,993	0,987	0,992	0,992	0,985	0,992	0,992	0,986
RMSE	1P	43,2	50,9	55,5	59,6	65,0	67,5	55,4	61,3	64,3
	1P + 2P	69,4	76,1	49,9	115,6	116,3	50,0	104,5	106,7	51,1
	1P + 1P + 2P + 3P	90,6	102,3	95,8	159,8	162,7	135,1	145,1	150,3	127,2

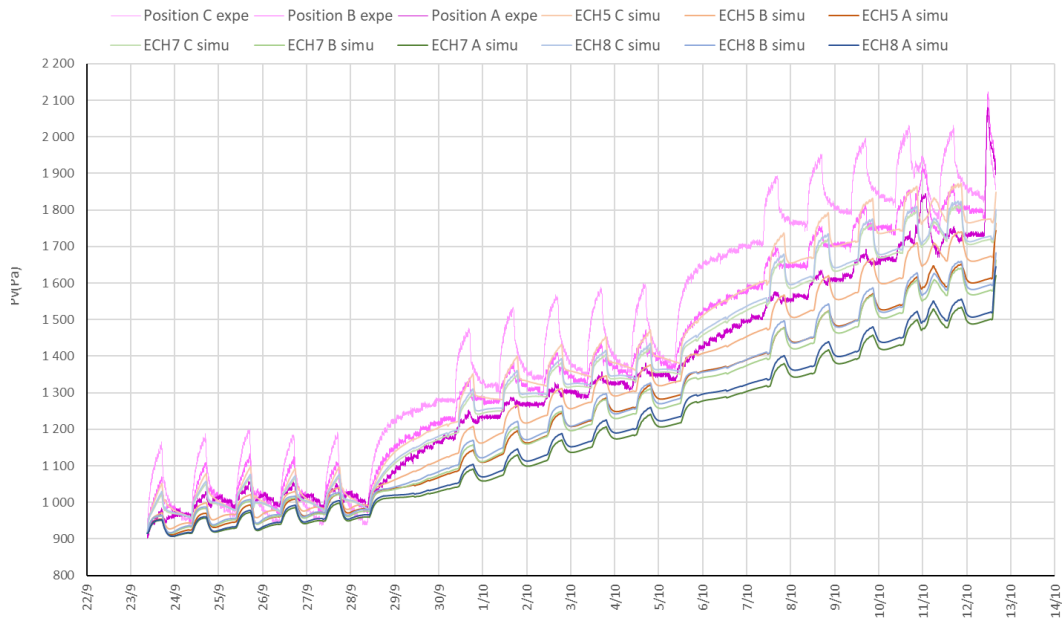


FIGURE 7 - Comparaison entre les données expérimentales de l'échantillon 6 et simulées - pression de vapeur

V. CONCLUSION

L'identification des paramètres hygriques faites sur l'essai hygrique dynamique a permis d'obtenir des isothermes de sorption et des valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau sur le domaine hygroscopique cohérentes avec la littérature scientifique. Les résultats sur les cinétiques de pression de vapeur sont plus mitigés, avec des valeurs issues de la simulation numérique plus faibles que celles obtenues expérimentalement.

Afin d'améliorer les prédictions numériques aux hautes humidités, il est nécessaire de prendre en le phénomène d'hystérésis et l'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de la teneur en eau. En l'état, le protocole ne permet pas d'identifier les propriétés hygriques du béton de chanvre à forte humidité, il est nécessaire soit de prolonger les périodes de sollicitation, soit d'augmenter les consignes au-delà de 80% d'humidité relative.

REMERCIEMENTS

Le projet de recherche doctorale EPHYPEND est co-financé par l'entreprise Kannwood, la région Bretagne et l'école doctorale SPL.Bzh. Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du projet CPER Mat&Trans 2021-2027 financé par l'Union Européenne, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, la Région Bretagne, le département 35 et Rennes Métropole. Ils ont également bénéficié du soutien de la chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Université de Rennes, ayant pour partenaires : Groupe Legendre, NGE Bâtiment, Rennes Métropole, Egis, Delta Dore, CETIH-Systovi, Sensing Vision. Enfin, merci à Tony Hautecoeur, notre technicien de laboratoire, pour sa contribution aux essais expérimentaux.

REFERENCES

- Barbhuiya, S., Bhusan Das, B., 2022. A comprehensive review on the use of hemp in concrete. *Construction and Building Materials* 341, 127857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127857>
- Benkhalla, S., Collet, F., Khaled, S., Hamieh, N., Bart, M., Meslem, A., Lanos, C., 2024b. De l'évaluation expérimentale à la simulation du comportement hygrothermique à l'échelle d'une brique de béton de chanvre. *Academic Journal of Civil Engineering* 42, 242–253. <https://doi.org/10.26168/ajce.42.1.22>
- Busser, T., Berger, J., Piot, A., Pailha, M., Woloszyn, M., 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>
- Chamoin, J., 2014. Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation (phdthesis). INSA de Rennes.
- Colinart, T., Magniont, C., 2025. RILEM TC 275-HDB: results of round-robin testing for the vapor permeability of hemp concrete. *Mater Struct* 58, 117. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02644-7>
- Collet, F., Chamoin, J., Pretot, S., Lanos, C., 2013. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings* 62, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>
- Collet, F., Mertens, S., Faria, P., 2025. RILEM TC 275-HDB round-robin tests and proposals: moisture buffer value of vegetal concrete. *Mater Struct* 58, 36. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02550-4>
- Collet, F., Pretot, S., 2014. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials* 65, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>
- Dubois, S., McGregor, F., Evrard, A., Heath, A., Lebeau, F., 2014. An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a Moisture Buffer Value test. *Building and Environment* 81, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.018>
- Gourlay, E., Glé, P., Marceau, S., Foy, C., Moscardelli, S., 2017. Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials* 139, 513–523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018>
- Jami, T., Karade, S.R., Singh, L.P., 2019. A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *Journal of Cleaner Production* 239, 117852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>
- Khaled, S., 2023. Contribution au développement d'une méthode inverse pour la caractérisation hygrique des matériaux de construction (phdthesis). Université de Rennes.
- Kunzel, H., 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters. *Fraunhofer Institute of Buildings Physics (Verlag Suttgart)* 1–66.
- Lelievre, D., Colinart, T., Glouannec, P., 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>
- Mazhoud, B., 2017. Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés (phdthesis). INSA de Rennes.
- Moissette, S., Bart, M., 2009. VALIDATION D'UN CODE DE TRANSFERT DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ DANS UNE PAROI SELON LA NORME EN 15026, in: IXème Colloque

- Interuniversitaire Franco-Québécois Sur La Thermique Des Systèmes. Lille, France, p. ART-23.
- Rode, C., Peuhkuri, R.H., Hansen, K.K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J., Ojanen, T., 2005. NORDTEST project on moisture buffer value of materials, in: AIVC Conference 'Energy Performance Regulation': Ventilation in Relation to the Energy Performance of Buildings. Bruxelles, Belgique, pp. 47–52.
- Samri, D., 2008. Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique. INSA Lyon.
- Seng, B., Magniont, C., Lorente, S., 2019a. Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. *Journal of Building Engineering* 24, 100540. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016>
- Seng, B., Magniont, C., Lorente, S., 2019b. Characterization of a precast hemp concrete block. Part II: Hygric properties. *Journal of Building Engineering* 24, 100579. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.09.007>
- Tran Le, A.D., 2010. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (These de doctorat). Reims.
- Vereecken, E., Roels, S., Janssen, H., 2018. Inverse hygric property determination based on dynamic measurements and swarm-intelligence optimisers. *Building and Environment* 131, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.030>
- Walker, R., Pavía, S., 2014. Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. *Construction and Building Materials* 64, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>
- Zakoune, A., 2011. Etude du comportement thermohydrrique de matériaux « chanvre-chaux » lors de la phase de séchage – Estimation par technique inverse des propriétés hydriques (phdthesis). Université de Bretagne Sud.
- Zhang, H., Yoshino, H., Hasegawa, K., 2012. Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and Environment* 48, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.012>