

De l'évaluation expérimentale à la simulation du comportement hygrothermique à l'échelle d'une brique de béton de chanvre

Saliha Benkhalla^{1,2}, Florence Collet¹, Sana Khaled^{1,3}, Nancy Hamieh¹, Marjorie Bart¹, Amina Meslem¹, Christophe Lanos¹

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

² Université Mohammed 6 Polytechnique, Lot 660, Hay Moulay Rachid, 43150 Benguerir, Maroc.

³ Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle Lamcube, École Centrale de Lille, 59650 Villeneuve-d'Ascq

RESUME La Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments s'inscrit dans les objectifs de réduction de l'empreinte carbone des bâtiments via leur rénovation. Elle a pour objectif de montrer l'efficacité de diverses solutions techniques en vue d'aboutir à la massification de leur usage. Les matériaux bio-sourcés s'inscrivent dans ces solutions techniques à travers leurs caractéristiques hygrothermiques contribuant à la performance des enveloppes et au confort des ambiances intérieures. Après avoir observé, compris et mis en valeur les phénomènes liés aux transferts hygrothermiques se produisant dans de tels matériaux, il convient désormais d'offrir aux bureaux d'études des outils pertinents et accessibles pour leur prise en compte précise. Les outils commerciaux s'appuient sur des modèles basiques ne prenant pas en compte les phénomènes complexes des transferts hygriques tels que l'hystérésis ou la cinétique de sorption. Il s'agit ici d'envisager une autre façon d'intégrer ces phénomènes complexes, en ayant recours à une identification des paramètres hygriques à partir de mesures en régime dynamique associées à une méthode inverse. Les paramètres identifiés sont utilisés en entrée d'un code commercial et permettent une très bonne prédiction de la réponse hygrique sur l'épaisseur d'une brique de béton de chanvre sous sollicitation dynamique.

Mots-clefs méthode inverse, isotherme de sorption, facteur de résistance à la vapeur, MBV, Wufi

I. INTRODUCTION

La Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Université de Rennes a mis en place un parement en béton de chanvre dans une salle de classe de l'IUT Génie Civil Construction Durable de Rennes. L'objectif de ce parement est de contribuer de façon passive à la régulation de l'ambiance intérieure de la salle de classe grâce à un effet tampon hygrique. Ce parement est donc instrumenté sur l'épaisseur afin de mesurer sa réponse hygrothermique aux sollicitations ambiantes (Collet et al., 2023). Il s'agira également de simuler le comportement hygrothermique de ce parement en conditions réelles.

Dans l'objectif de massifier le recours à de telles solutions, il est nécessaire de pouvoir valoriser correctement le comportement hygrothermique des matériaux bio-sourcés en le simulant avec des

outils utilisables dans les bureaux d'études. L'outil sélectionné ici est le logiciel Wufi Pro 6.5®, basé sur le modèle de Kunzel (Kunzel, 1995), et où la caractérisation hygrique dans le domaine hygroscopique repose sur une branche de sorption unique et un facteur de résistance à la diffusion de vapeur constant ou variable sur le domaine. De façon générale, les codes basés sur le modèle de Kunzel décrivent relativement bien la réponse hygrique d'un point de vue qualitatif mais conduisent à des réponses amplifiées et/ou déphasées. L'introduction de la prise en compte de l'hystérésis et d'une cinétique de sorption dans les modèles développés en laboratoire permet alors une simulation plus juste de la réponse hygrique des parois (Johannesson et Nyman, 2010) (Lelièvre et al., 2014) (Aït Oumeziane et al., 2014) (Reuge et al., 2021). Toutefois, ces méthodes sont trop complexes et lourdes pour être utilisées en bureau d'études.

Par ailleurs, la diffusivité hygrique calculée à partir des données de régime permanent diffère de celle issue de données en régime dynamique. Le recours à des données issues de mesures en régime dynamique en alimentation des codes de simulation pourrait permettre une meilleure performance dans la prédiction des réponses hygriques.

Cet article a pour objectif d'évaluer l'aptitude du logiciel Wufi Pro 6.5® à produire une simulation acceptable du comportement hygrothermique du béton de chanvre en utilisant en données d'entrée l'isotherme d'adsorption et le facteur de résistance à la vapeur identifiés à l'aide de la méthode inverse développée au LGCGM (Khaled, 2023). Après détermination de ces données, un essai de type MBV est alors réalisé, en conditions contrôlées, sur des briques instrumentées sur l'épaisseur, en température et en humidité relative. Les cinétiques de pression de vapeur simulées numériquement aux différentes positions sont alors confrontées aux cinétiques expérimentales.

II. PRESENTATION DU BETON DE CHANVRE UTILISE ET DE SES PROPRIETES MULTIPHYSIQUES

Le béton de chanvre considéré est un produit commercial, il s'agit des briques MULTICHANVRE de dimensions $60 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$. Les caractéristiques de ces briques sont répertoriées dans le tableau 1 qui regroupe les données fabricant et celles mesurées. L'ambiance du laboratoire est régulée à $23 \text{ }^\circ\text{C}$, mais n'est pas contrôlée en humidité relative. Le séchage est réalisé en étuve à $60 \text{ }^\circ\text{C}$. La porosité est calculée à partir de la mesure de la masse volumique apparente et de la masse volumique réelle mesurée au pycnomètre. La conductivité thermique est mesurée avec un fil chaud de 5 cm, selon la méthode présentée dans (Collet and Pretot, 2014).

TABLEAU 1. Propriétés physiques de la brique commerciale MULTICHANVRE

	Données Fournisseur	Mesure en laboratoire
Masse volumique [kg.m^{-3}]	360 (conditions non fournies)	Ambiance : 310 ± 7 Sec : 301 ± 11
Porosité [%]	-	84
Conductivité thermique au point sec [$\text{W}/(\text{m.K})$]	-	0.090
Résistance thermique [$\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$]	1.5	1.0

La caractérisation hygrique repose sur la réalisation d'un essai MBV permettant la mesure de la valeur MBV ainsi que l'identification de l'isotherme de sorption et du facteur de résistance à la vapeur par méthode inverse.

Le protocole utilisé pour la mesure de la valeur MBV est basé sur le protocole défini par le NORDTEST Project (Rode et al., 2005). Les échantillons utilisés sont des cubes de 10 cm d'arrête. Ils sont étanchés sur toutes les faces sauf la surface d'échange. Après stabilisation à (23 °C ; 50 %HR), ils sont soumis à des cycles d'humidité (8 heures à 75 %HR suivies de 16 heures à 33 %HR), avec une vitesse d'air autour de 0.1 m/s. Ici, préalablement à la stabilisation, les échantillons sont séchés en vue de déterminer leur teneur en eau initiale. La valeur MBV est le rapport de la variation de masse au cours de la phase d'adsorption / de désorption au produit de la surface d'échange et de l'écart entre les humidités relatives hautes et basses. Pour chaque échantillon, la valeur MBV est la moyenne des valeurs obtenues sur les trois derniers cycles. L'essai est répété sur trois échantillons. La valeur MBV du matériau est la moyenne des valeurs obtenues sur les trois échantillons. La figure 1 présente l'évolution de l'humidité relative et de la masse de l'échantillon HC-16 à titre d'exemple au cours des cycles. Les pics d'humidité relative correspondent aux ouvertures des portes lors des pesées. L'humidité relative haute moyenne est de 70.8 %, l'humidité relative basse moyenne est de 29.0 %. La valeur MBV moyenne mesurée sur les trois échantillons est de 2.29 g/(m².%HR), avec un écart-type de 0.09 g/(m².%HR).

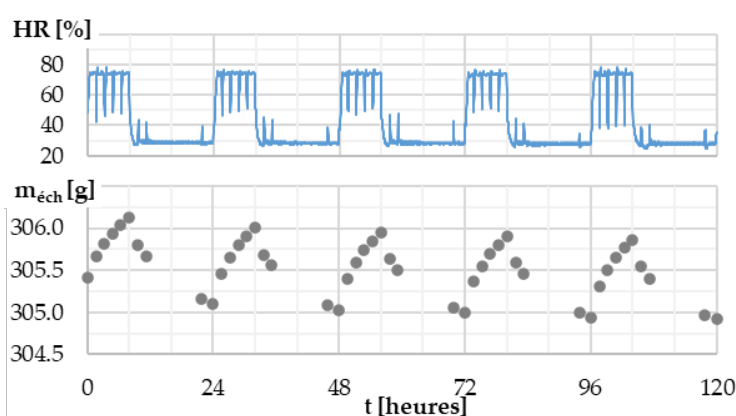


FIGURE 1. Evolution de l'Humidité Relative et de la masse de l'échantillon HC-16 lors de l'essai MBV

Les isothermes de sorption et la perméabilité à la vapeur sont identifiées en utilisant la méthode inverse développée dans (Khaled, 2023). La cinétique d'accumulation d'eau par unité de surface lors de l'essai MBV est simulée avec le code TMC intégrant l'hystérésis (Oumeziane et al., 2014). L'isotherme de sorption et la perméabilité à la vapeur sont identifiées en minimisant l'écart entre la cinétique simulée et la cinétique expérimentale avec le solveur lsqcurvefit de MATLAB. La figure 2(a) montre le très bon ajustement de la cinétique simulée à l'issue de l'identification des paramètres à la cinétique expérimentale. La branche d'adsorption identifiée est présentée figure 2(b). La perméabilité à la vapeur d'eau est de 1.026×10^{-10} kg/(m.s.Pa), soit un facteur de résistance à la vapeur d'eau de 1.91. Les isothermes de sorption sont comparables à la littérature et le facteur de résistance à la vapeur est légèrement inférieur car il s'agit d'un facteur apparent (Lelièvre et al., 2014) (Latif et al., 2015) (Collet et al., 2013).

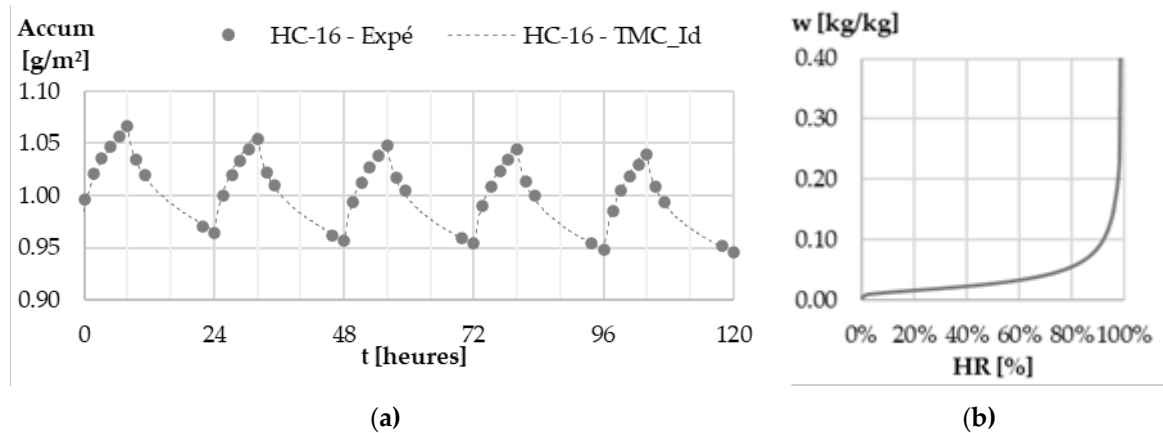


FIGURE 2. Identification des paramètres hygriques à partir des cinétiques d'accumulation d'eau au cours de l'essai MBV – (a) cinétique expérimentale (HC-16-Expé) et cinétique simulée à l'issue de l'identification (HC-16-TMC_Id), (b) Branche d'adsorption du béton de chanvre identifiée

III. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REPOSE DES BRIQUES DE BETON DE CHANVRE A DES SOLLICITATIONS HYGRIQUES CYCLIQUES

A. Présentation de l'étude expérimentale

Cette étude a pour objectif d'étudier la réponse du béton de chanvre, à l'échelle des briques, à des sollicitations hygriques cycliques. Les consignes visées sont les mêmes que celles de l'essai MBV : après stabilisation à (23 °C, 50 %HR) sans séchage préalable, des cycles d'humidité relative de 8 heures à 75 %HR, suivies de 16 heures à 33 %HR sont répétés. L'essai est réalisé au sein de l'enceinte QUALIDIF de dimensions $L = 3.5 \text{ m} \times l = 3.5 \text{ m} \times h = 2.5 \text{ m}$, dont l'ambiance est régulée par une Centrale de Traitement d'Air. La vitesse est contrôlée pour être autour de 0.1 m/s au voisinage de la surface d'échange des briques. L'ambiance est enregistrée à proximité par des capteurs ARANET 4.

Six briques sont sélectionnées sur la base de leur masse volumique apparente pour être représentatives (moyenne du lot sélectionné : 312 kg/m^3 , écart-type : 7 kg/m^3). Trois sont utilisées pour réaliser un essai MBV classique et trois pour un suivi instrumenté. La figure 3 présente une vue d'ensemble du banc expérimental et le détail de l'instrumentation d'une brique. Conformément aux recommandations pour la réalisation des essais MBV sur de petits échantillons, seule la surface d'échange est laissée libre, toutes les autres surfaces sont étanchées par deux couches croisées de scotch aluminium. Trois briques (HC_REB-2, 4 et 6) font l'objet d'un suivi massique, avec une balance Sartorius LP 8200 S, afin de calculer la valeur MBV et de la comparer à la valeur mesurée sur les échantillons de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Les trois autres briques (HC_REB-1, 3 et 5) sont instrumentées sur l'épaisseur avec des sondes SHT 35 préalablement vérifiées avec des solutions salines. Sur la plage de mesure, la précision des sondes SHT 35 est de 0.2 °C et 1.5 %HR. Ces sondes sont placées à différentes profondeurs par rapport à la surface d'échange en perçant la brique par le bord supérieur, puis en comblant le trou autour de la sonde avec des débris de briques avant d'étancher. La taille de la sonde est de l'ordre de celle d'une chènevotte et celle du trou est légèrement supérieure, tout en restant inférieure à la dimension

caractéristique du Volume Élémentaire Représentatif. Les positions sont repérées par rapport à la face arrière, la position 7.5 cm correspond à 2.5 cm de profondeur par rapport à la surface d'échange. Le pas d'acquisition sélectionné est de 3 minutes. La pression de vapeur est calculée à partir de la température T et de l'humidité relative HR selon l'équation utilisée dans Wufi (WUFI, 2022) :

$$P_v = HR \times 610.78 \exp\left(17.08 \frac{T}{234.18 + T}\right) \quad (1)$$

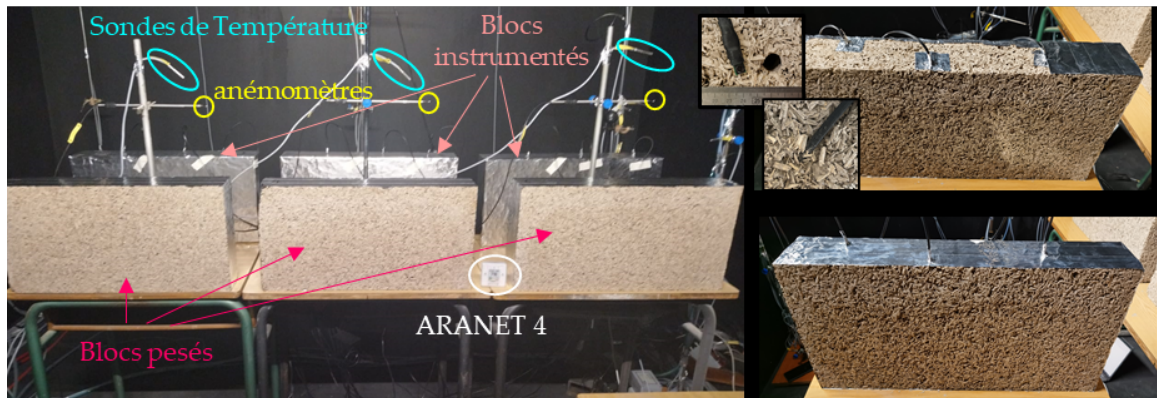


FIGURE 3. Essai de sollicitations hygriques cycliques dans l'enceinte climatisée QUALIDIF – haut : vue d'ensemble, bas : instrumentation d'une brique

B. Résultats expérimentaux

La figure 5 présente l'évolution de la température et de l'humidité relative au cours des cycles. Du fait du changement d'échelle, celles-ci sont moins bien maîtrisées que lors des essais en armoire climatique à l'échelle de l'échantillon. La température est comprise entre 21.1 et 23.9 °C, avec une valeur moyenne de 22.3 °C et un écart-type de 0.5 °C. Durant les phases d'adsorption, l'humidité relative moyenne est de 71.9 ± 4.8 %, ce qui est comparable au palier haut obtenu lors des essais à l'échelle de l'échantillon. Durant les phases de désorption, l'humidité relative moyenne est de 52.6 ± 4.5 %, ce qui est plus élevé que le palier bas obtenu lors des essais à l'échelle de l'échantillon. Bien que les sollicitations hygriques appliquées ne soient pas rigoureusement les mêmes, elles se situent dans le même domaine de capacité hygrique du béton de chanvre utilisé.

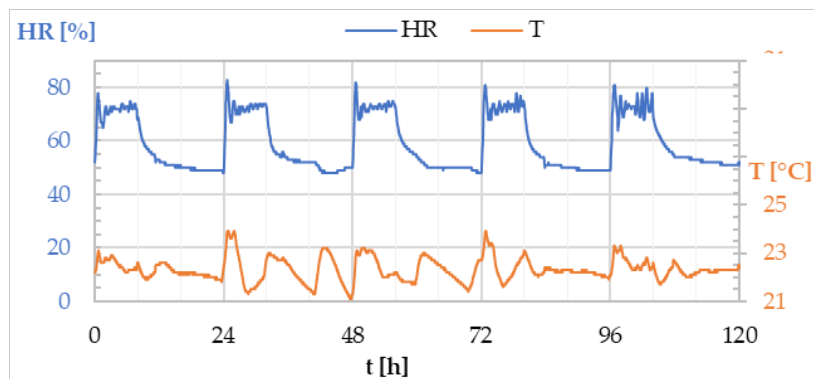


FIGURE 4. Température et humidité relative ambiante au cours des cycles hygriques

La figure 5 présente les cinétiques de variation de masse par rapport au point initial des cycles. Les résultats obtenus pour les trois briques sont très proches tout au long des cycles. Les coefficients de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) sur les variations de masse entre les trois briques sont inférieurs à 3 % au cours des phases d'adsorption et à 4 % au cours des phases de désorption. Le critère de stabilité des cycles, avec des écarts sur les variations de masse inférieurs à 5 % sur les trois derniers cycles, n'est pas atteint du fait de la précision de la régulation de l'ambiance. Toutefois, le coefficient de variation de la valeur MBV au cours des trois derniers cycles est compris entre 2.1 % pour la brique 2 et 5.5 % pour la brique 3. La valeur MBV des briques calculée à partir de la moyenne sur les trois derniers cycles pour les trois briques est de $2.24 \pm 0.04 \text{ g}/(\text{m}^2.\% \text{HR})$. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus à l'échelle des échantillons, bien que la plage d'humidité relative parcourue soit légèrement différente, la capacité hygrique sur les plages d'humidité explorées restant quasi-constante.

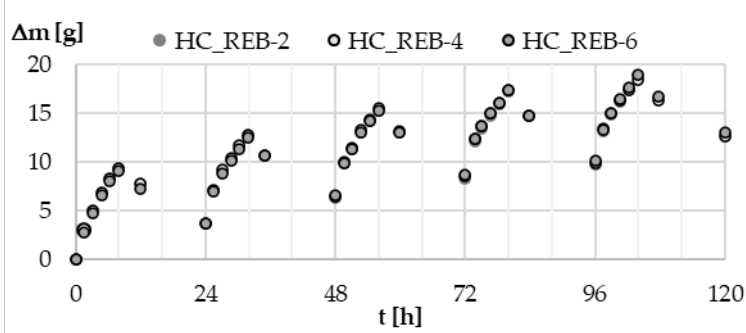


FIGURE 5. Variation de masse par rapport à la masse initiale des cycles

La figure 6 présente l'exemple des cinétiques de température et d'humidité relative ambiantes et au sein de la brique HC_REB-1 aux différentes positions. Les variations de température ambiante se répercutent sur toute l'épaisseur de la brique. Durant les phases d'adsorption, l'augmentation de température est amplifiée en lien avec les échanges de chaleur associés aux phénomènes de sorption. Les cycles d'humidité relative montrent un faisceau ascendant au cours des premiers cycles, qui se stabilise aux cycles suivants. L'amplitude d'humidité relative au cours d'un cycle est amortie avec la distance à la surface d'échange. A 2.5 cm de profondeur (HC_REB-1_7.5 cm), l'amplitude au cours d'un cycle est de l'ordre de 8 %HR ; à 5 cm de profondeur (HC_REB-1_5 cm), elle est d'environ 3 %HR.

La figure 7 présente les cinétiques de pression de vapeur aux différentes positions pour les trois briques. Les réponses hygriques présentent une bonne répétabilité entre les trois briques, avec quelques écarts qui peuvent être attribués à la précision de la position de la sonde dans la brique, voire un mauvais remplissage du trou pour la sonde HC_REB-5_2.5 cm. En effet, sa réponse est particulièrement proche de la sonde HC_REB-5_5 cm. Si le percement pour le passage de la sonde est mal comblé, la vapeur d'eau se diffuse beaucoup plus facilement dans cette zone conduisant à une réponse équivalente à celle obtenue plus près de la surface d'échange. Les allures des cinétiques de pression de vapeur résultent du couplage de celles de température et d'humidité relative. Les cycles de 8 heures en adsorption / 16 heures en désorption s'illustrent par des phases de pression de vapeur croissantes-décroissantes. Les augmentations secondaires de pression de

vapeur en fin des phases d'adsorption sont liées aux augmentations de température ambiante. En fin de phase de désorption, la pression de vapeur à 5 cm de la surface d'échange rejoint la valeur de celle à 7.5 cm (HC_REB-1_2.5 cm).

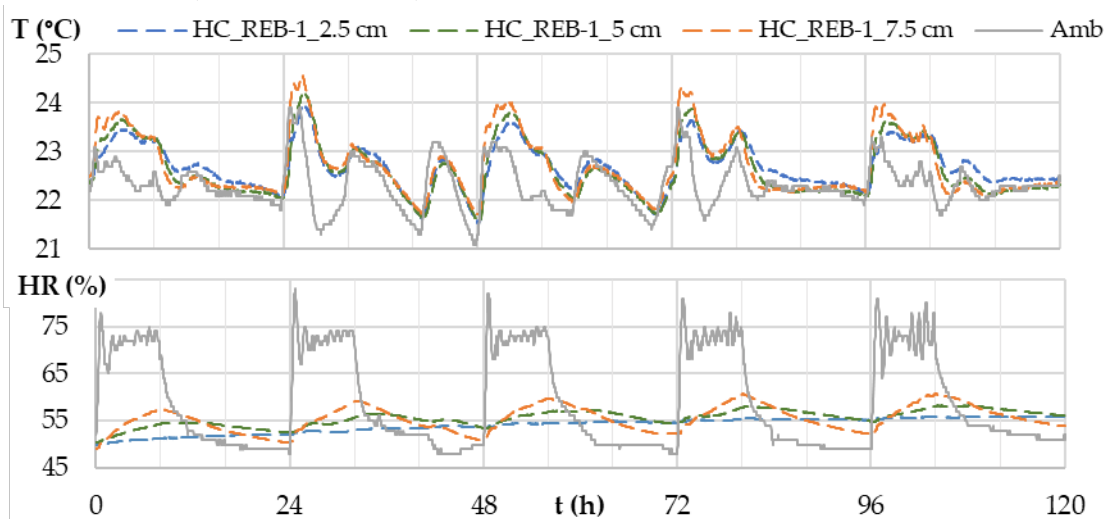


FIGURE 6. Cinétiques de température et d'humidité relative au sein de la brique HC_REB-1 aux différentes positions par rapport à la surface d'échange 2.5, 5 et 7.5 cm

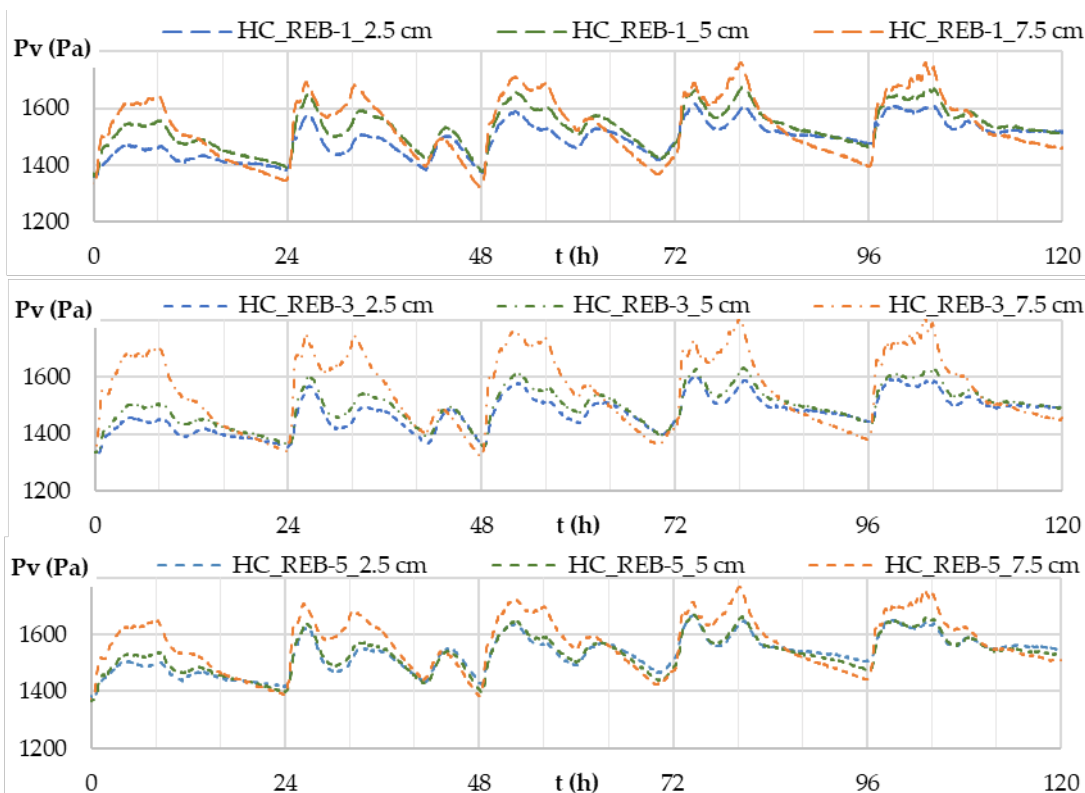


FIGURE 7. Cinétique de pression de vapeur au sein des briques HC_REB-1, HC_REB-3 et HC_REB-5 aux différentes positions par rapport à la surface d'échange 2.5, 5 et 7.5 cm

IV. SIMULATION NUMERIQUE DE LA REPOSE DES BRIQUES DE BETON DE CHANVRE AUX SOLLICITATIONS HYGRINIQUES CYCLIQUES

A. Présentation de l'étude numérique

Le logiciel sélectionné pour simuler le comportement hygrothermique des briques de béton de chanvre est le logiciel WUFI Pro 6.5® car il est utilisé dans certains bureaux d'études. Ce logiciel prend en compte la conduction, le stockage de chaleur, la diffusion de vapeur, le transfert liquide, le stockage d'humidité et l'échange de chaleur latente. WUFI Pro 6.5® est basé sur le modèle de Kunzel (Kunzel, 1995) où les processus relatifs au transfert de chaleur et d'humidité sont donnés par deux équations aux dérivées partielles (2) et (3) ayant pour potentiels moteurs la température et l'humidité relative.

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi \cdot P_{sat})) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \cdot \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi \cdot P_{sat})) \quad (3)$$

où $\partial W/\partial \varphi$ est la capacité hydrique du matériau (kg/m^3), $\partial H/\partial T$ la capacité thermique du matériau ($\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$), h_v la chaleur latente d'évaporation de l'eau (J/kg), λ la conductivité thermique du matériau ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), T la température ($^{\circ}\text{C}$), t le temps (s), D_{φ} : coefficient de transport liquide du matériau ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$), δ_p la perméabilité à la vapeur du matériau ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$), P_{sat} la pression partielle de vapeur saturante de la vapeur d'eau dans l'air (Pa), W la teneur en eau volumique (kg/m^3), φ l'humidité relative (-). Dans cette étude, le transfert liquide est négligé du fait des conditions ambiantes inférieures à 80 %HR.

Les propriétés du béton de chanvre considérées pour l'étude sont celles présentées dans la section II. Pour les propriétés manquantes, telles que la chaleur massique ou le coefficient de diffusion liquide, les données du béton de chanvre « Hanf-kalk-Dammung » de la bibliothèque Wufi sont considérées.

Les conditions aux limites correspondent de part et d'autre à l'enregistrement de l'ambiance au cours de l'essai. Les conditions initiales correspondent aux profils de température et d'humidité relative mesurées en fin de phase de stabilisation.

La configuration géométrique, de l'extérieur à l'intérieur, comprend une couche d'étanchéité BARRIER ALU et une couche de béton de chanvre de 10 cm d'épaisseur. Le maillage utilisé est un maillage resserré à proximité des surfaces (figure 8). Trois moniteurs sont placés au centre des mailles les plus proches des positions expérimentales. Le calcul est mené avec un pas de temps de 3 minutes. La résistance superficielle d'échange de chaleur considérée est de $0.125 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ et le coefficient de transfert de vapeur superficiel est de $2.2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa})$.

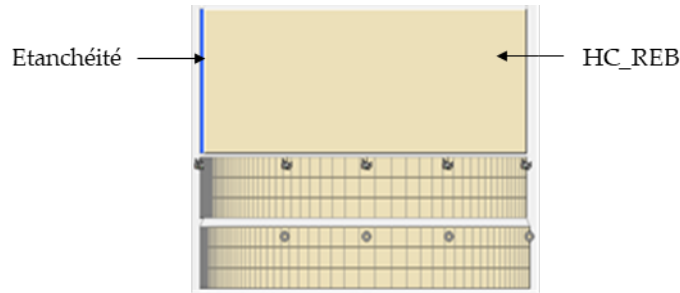


FIGURE 8. Configuration géométrique et maillage

Les résultats sélectionnés en sortie comprennent, à chaque pas de temps, les conditions ambiantes (pour vérification), le flux d'humidité à la surface d'échange, la température, l'humidité relative et la pression de vapeur au niveau des moniteurs.

B. Simulation essai MBV instrumenté

La figure 9 donne l'évolution de l'humidité relative ambiante au cours du temps ainsi que la variation de masse par rapport au début des cycles et rapportée à la surface, pour les trois échantillons et la simulation. Les cinétiques numériques décrivent correctement les cinétiques expérimentales d'un point de vue qualitatif. D'un point de vue quantitatif, les prises de masse à l'issue des phases d'adsorption sont surestimées et conduisent à une dérive du faisceau de prise de masse surfacique. La valeur MBV calculée à partir des simulations est surestimée : 3.08 g/(m².%HR) contre 2.24 g/(m².%HR) pour les mesures sur les briques. Ces surestimations peuvent être attribuées à la non prise en compte de l'hystérésis dans le modèle.

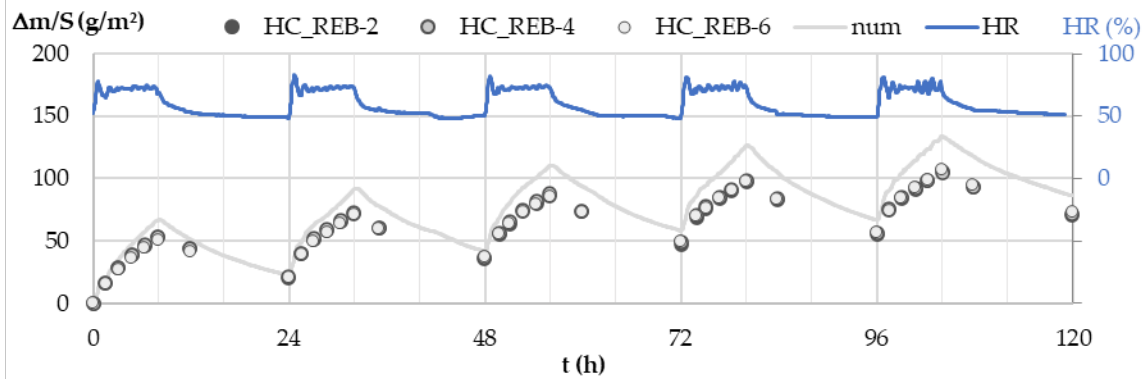


FIGURE 9. Humidité relative ambiante et variation de masse rapportée à la surface, à partir du début du premier cycle, mesurée sur trois échantillons et simulée numériquement

La figure 10 donne les cinétiques de pression de vapeur aux différentes positions dans la brique de béton de chanvre obtenues expérimentalement, sur les trois briques, et numériquement. Les résultats numériques s'inscrivent parfaitement dans les résultats expérimentaux aussi bien en termes d'amplitude que de dynamique de variation. Cela est souligné par les coefficients de corrélation R^2 élevés, entre 0.943 et 0.988, récapitulés dans le tableau 2. Ces coefficients sont calculés entre les points expérimentaux et les simulations dont les positions diffèrent légèrement,

comme rappelé dans le tableau. Il semble donc que le recours à une isotherme de sorption et à une valeur de facteur de résistance à la vapeur identifiés par méthode inverse permet de simuler une réponse hygrique représentative (champs de température et champ d'humidité relative) bien qu'une légère dérive de la teneur en eau soit associée.

TABLEAU 2. Coefficient de corrélation R^2 entre les pressions de vapeur expérimentales et les pressions de vapeur simulées

Position expé/num	2.5 / 2.58 cm	5.0 / 5.06 cm	7.5 / 7.57 cm
HC_REB-1	0.982	0.943	0.981
HC_REB-3	0.980	0.970	0.953
HC_REB-5	0.983	0.977	0.988

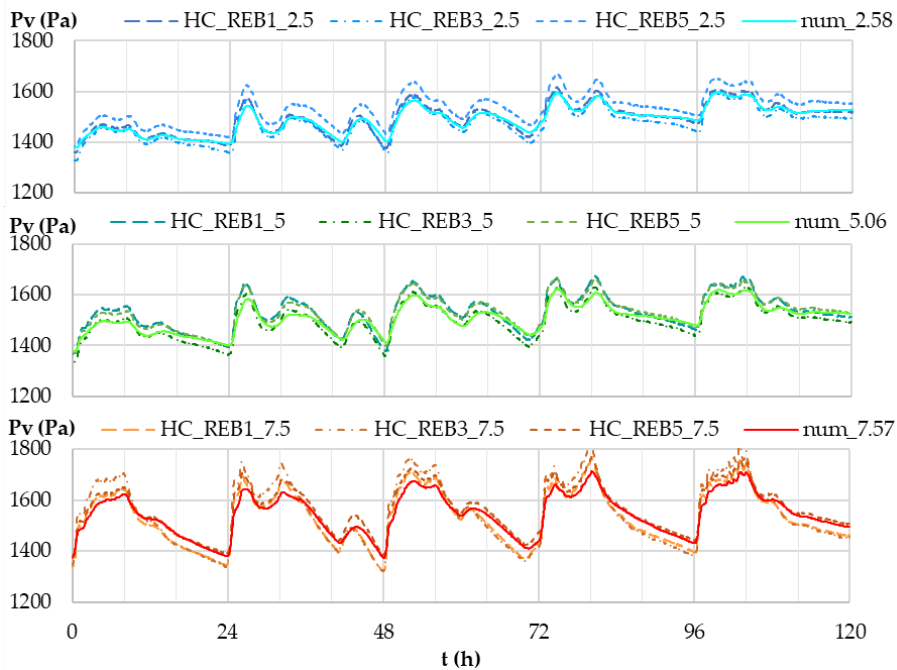


FIGURE 10. Pressions de vapeurs expérimentales et numérique à différentes profondeurs

V. CONCLUSION

Cette étude, menée dans le cadre de la Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiment de la Fondation Université de Rennes, montre que le logiciel Wufi Pro 6.5[®] permet de simuler précisément les cinétiques de pression de vapeur à différentes positions dans une brique de béton de chanvre soumise à des sollicitations hygriques dynamiques en utilisant l'isotherme de sorption et le facteur de résistance à la vapeur d'eau identifiés par méthode inverse.

Dans un premier temps, la masse volumique, la porosité et la conductivité thermique du béton de chanvre sont déterminées selon des protocoles expérimentaux usuels. La détermination de l'isotherme de sorption et de la perméabilité à la vapeur apparentes sont réalisées avec la méthode inverse développée au LGCGM. Celle-ci repose sur la cinétique d'accumulation d'eau lors de l'essai MBV.

L'étude expérimentale menée ensuite à l'échelle de briques de béton de chanvre conduit à des valeurs MBV comparables à celles mesurées à l'échelle de l'échantillon et produit des mesures de cinétiques de température, d'humidité relative et de pression de vapeur à différentes positions dans les briques soumises à des sollicitations hygriques dynamiques.

La simulation de cet essai sur Wufi Pro 6.5 ® conduit à des cinétiques de pression de vapeur en très bon accord avec les cinétiques expérimentales pour toutes les positions considérées.

Cette validation a été réalisée sur une étude quasi-isotherme à l'échelle d'une brique de béton de chanvre. Il convient désormais d'appliquer cette méthode pour la simulation du comportement hygrothermique du parement en béton de chanvre installé dans le démonstrateur de l'IUT de Rennes. Cela permettra alors de valider pleinement la capacité de Wufi Pro 6.5 ® à simuler le comportement hygrothermique des parois en béton de chanvre selon cette méthode et permettra ainsi d'envisager la massification à son recours pour valoriser au mieux les propriétés hygrothermiques des matériaux bio-sourcés dans le cadre de rénovation ou de bâtiments neufs.

REMERCIEMENTS

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la chaire Rénovation Energétique des Bâtiments de la Fondation Université de Rennes. Les auteurs remercient la Fondation ainsi que tous les partenaires de la Chaire : Groupe Legendre, NGE Bâtiment, Rennes Métropole, Egis, Delta Dore, CETIH-Systovi, Sensing Vision.

Merci également à Tony Hauteceur, notre technicien de laboratoire, pour sa contribution aux essais expérimentaux.

REFERENCES

Aït Oumeziane, Y., Bart, M., Moissette, S., Lanos, C., (2014). Hysteretic Behaviour and Moisture Buffering of Hemp Concrete. *Transp Porous Med* 103, 515–533. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0314-7>

Collet, F., Prétot, S., Meslem, A., Lanos, C. (2023). Chaire Rénovation Energétique des Bâtiments – mise en œuvre d'un parement en béton de chanvre dans un démonstrateur, 41èmes Rencontres lors du Congrès Français de Génie Civil AUGC/AFGC, du 23 au 25 mai 2023, Gif sur Yvette, ENS Paris-Saclay.

Collet, F., Chamoin, J., Prétot, S., Lanos, C. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy Build.* 62, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>

Collet, F., Prétot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, p. 612-619, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.

Johannesson, B., Nyman, U. (2010). A numerical approach for non-linear moisture flow in porous materials with account to sorption hysteresis. *Transp. Porous Med.* 84, 735–754

Khaled, S. (2023) Contribution au développement d'une méthode inverse pour la caractérisation hygrique des matériaux de construction, thèse de doctorat, Université de Rennes

Künzel, H. (1995) *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-4103-7, Fraunhofer IBP Stuttgart, Allemagne

Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment* 93, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>

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>

Reuge N, Collet F, Pretot S et al. (2021) Kinetics of sorption in bio-based materials: theory and simulation of a demonstrator wall. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials* 174(3): 129–139, <https://doi.org/10.1680/jcoma.19.00094>

Rode, C., Peuhkuri, R.H., Mortensen, L.H., Hansen, K.K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J. (2005). *Moisture buffering of building materials - BYG-DTU R-126*.

WUFI Wärme Und Feuchte Instationär software (2022) Available online: <https://wufi.de/en/> (29th January 2022).