

# Impact de l'anisotropie sur le stockage et le transfert d'humidité dans le Béton de Chanvre

Sana KHALED <sup>1,2</sup>, Sylvie PRETOT <sup>1</sup>, Marjorie BART <sup>1</sup>, Florence COLLET <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France.

**RESUME** Le béton de chanvre, matériau biosourcé largement utilisé dans la construction durable, est reconnu pour sa capacité à réguler l'humidité. Lors de sa mise en œuvre, le béton de chanvre peut être compacté. Cette étude vise à analyser l'effet du compactage sur le comportement hygrique du matériau en s'appuyant sur la mesure des cinétiques et des isothermes de sorption, conformément à la méthode discontinue définie par la norme NF EN ISO 12571. Deux séries d'échantillons cylindriques sont préparées : l'une avec les faces supérieures et inférieures scellées, assurant un transfert radial et l'autre avec la face latérale scellée, assurant un transfert longitudinal. Ces deux séries présentent des masses volumiques apparentes sèches proches ( $424,5 \pm 10,4 \text{ kg/m}^3$  et  $395,0 \pm 13,8 \text{ kg/m}^3$ ). Les résultats montrent que les teneurs en eau d'équilibre, mesurées à différentes humidités relatives, sont similaires entre les deux configurations, soulignant que l'anisotropie n'influence pas le stockage de l'humidité. Cependant, les cinétiques de sorption diffèrent selon la direction de sollicitation, avec des diffusions plus rapides dans le cas du transfert parallèle à la direction de compactage.

**Mots-clefs** Béton de chanvre, Isothermes de sorption, Méthode discontinue, Anisotropie

## I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la construction durable, les matériaux biosourcés, tels que le béton de chanvre, sont de plus en plus utilisés pour leurs performances environnementales et hygrothermiques (Amziane, S., Collet, F., et Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M., 2017). En effet, ces matériaux contribuent à l'efficacité énergétique du bâti et au confort intérieur (Bennai et al. 2022). Le béton de chanvre contribue notamment à la régulation passive de l'humidité intérieure, en apportant un tampon hygrique résultant des propriétés de transfert et de stockage, rendues possibles par sa structure poreuse (Collet et al. 2013; Chamoin, 2013 ; Lelievre, Colinart, et Glouannec 2014; Latif et al. 2015).

Les propriétés de stockage sont fréquemment décrites par des isothermes de sorption, qui illustrent les interactions entre la vapeur et le matériau ((Fabbri et al., 2015); (Vu, Spagnol, et Magniont 2015); (Rahim et al. 2016)). Elles permettent également de mettre en évidence des phénomènes tels que l'hystérésis, qui se manifeste par une différence entre les branches d'adsorption et de désorption. La mesure des isothermes de sorption peut être réalisée à l'aide de méthodes de mesure continues ou discontinues. La méthode continue permet de mesurer les variations de masse de l'échantillon en temps réel sous des changements progressifs d'humidité relative, fournissant des données

dynamiques. La méthode discontinue, décrite dans la norme (« NF EN ISO: 12571, « Détermination des propriétés de sorption hygroscopique » » 2021), repose sur la stabilisation de l'échantillon à des paliers successifs d'humidité relative. De plus, les cinétiques de stabilisation peuvent être considérées pour qualifier la diffusion dans le matériau.

La mise en œuvre du béton de chanvre, notamment par compactage, peut organiser sa structure en orientant les chènevottes de manière préférentielle. Plusieurs études montrent l'effet de l'anisotropie sur les propriétés multiphysiques : conductivité thermique, propriétés mécaniques, MBV ( (Nguyen et al. 2010) ; (Collet et al. 2013); (Mazhoud 2018); (Williams, Lawrence, et Walker 2017) ; (Brzyski et al. 2021)).

Cette étude s'intéresse à l'effet du compactage sur le comportement hygrique du béton de chanvre. Elle repose sur la mesure des isothermes de sorption selon une méthode discontinue, ainsi que sur l'analyse des cinétiques de stabilisation, en comparant deux lots d'échantillons : l'un sollicité dans la direction du compactage (transfert longitudinal) et l'autre perpendiculairement à celle-ci (transfert radial).

## II. MATERIAU ET METHODE

### A. Méthode expérimentale

Dans ce travail, les isothermes de sorption sont obtenues à une température constante de 23 °C, en se basant sur la norme NF EN ISO 12571 (2021), en appliquant des paliers successifs d'hygrométrie croissante, puis décroissante. Ce protocole permet de tracer :

- **La courbe d'adsorption principale** aux niveaux d'humidité relative (HR) de 20 %, 35 %, 50 %, 65 %, 80 % et 90 %. La valeur maximale de 90 %HR est choisie afin de prévenir l'apparition de moisissures susceptibles d'endommager les échantillons ;
- **La courbe de désorption primaire** aux mêmes niveaux d'humidité.

Les points secs sont obtenus par séchage à 60 °C, conformément aux recommandations du RILEM TC 236-BBM (Amziane et al., 2017), afin d'éviter tout dommage. Les échantillons sont ensuite stabilisés aux différents paliers d'humidité relative dans une armoire climatique Memmert HPP226.

Le point sec et les points stabilisés sont atteints lorsque la variation relative de masse (1) est inférieure à 0,1 % pour le point sec, conformément à la norme NF EN ISO 12571 (2021) et à 0,01 % pour les points humides, sur 3 pesées consécutives

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)_{24h} = \frac{m_{i+1} - m_i}{m_i} \quad (2)$$

Où  $m$  est la masse de l'échantillon [g],  $t$  la date et l'heure de pesée [jj], et  $i$  l'indice temporel.

La teneur en eau ( $w$ ) des échantillons est calculée à chaque palier d'humidité relative en utilisant l'équation suivante :

$$w = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \quad (3)$$

Où  $m_{\text{humide}}$  est la masse de l'échantillon stabilisé à un palier donné d'humidité relative et  $m_{\text{sec}}$  est la masse sèche de l'échantillon obtenue après séchage à 60 °C.

L'analyse des cinétiques est réalisée en calculant la vitesse de variation de teneur en eau rapportée à l'aire de la surface d'échange, dénommée ici coefficient de diffusion. Ce coefficient est égal au coefficient directeur de l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps, sur les trois pesées consécutives au changement de palier, rapporté à l'aire de la surface d'échange.

### B. Matériau et échantillons

L'étude est réalisée sur du béton de chanvre, désigné par TH, composé de liant Thermo®, de chènevotte Biofibat® et d'eau, préparé selon les proportions massiques chanvre/liant = 0,5 et eau/liant = 0,8.

Dans Mazhoud (2017), la longueur des chènevottes Biofibat® est comprise entre 2,5 et 30 mm, avec une longueur médiane de 11,5 mm et une longueur à 90 % de passant de 19,4 mm. Leur largeur varie de 0,7 à 7 mm, avec une largeur médiane de 2,9 mm et une largeur à 90 % de passant de 4,8 mm. Les élongations  $\varepsilon_{50}$  et  $\varepsilon_{90}$  sont de 3,8 et 6,5. Bien que les chènevottes utilisées ici ne soient pas du même lot, ces grandeurs donnent une indication représentative de la taille et de la forme des chènevottes utilisées ici.

Tous les échantillons sont fabriqués par compactage sous une pression de 0,1 MPa. Ce mode de fabrication peut entraîner une orientation préférentielle des particules de chènevotte dans le plan perpendiculaire à la direction de compactage. Afin d'étudier un effet d'anisotropie possible deux lots d'échantillons cylindriques de même diamètre sont produits, l'un (TH-a) avec un élanement de l'ordre de 1,33 qui sera soumis à un transfert radial en étanchant les surfaces supérieure et inférieure, l'autre (TH-d) avec un élanement de l'ordre de 1 qui sera soumis à un transfert longitudinal en étanchant la surface périphérique (FIGURE 1). Le TABLEAU 1 récapitule les dimensions des deux lots d'échantillons. Les hauteurs du lot TH-d sont comparables aux diamètres du lot TH-a et les masses volumiques apparentes sont proches, avec un écart de l'ordre de 7%. Tous les échantillons sont exposés de façon à avoir un transfert horizontal, perpendiculaire à la gravité.

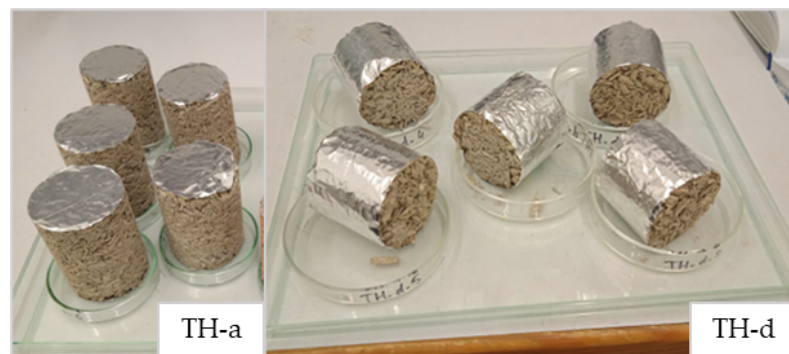


FIGURE 1. Échantillons de TH- a et d

**TABLEAU 1. Dimensions et masses volumiques apparentes sèches des deux lots de béton de chanvre**

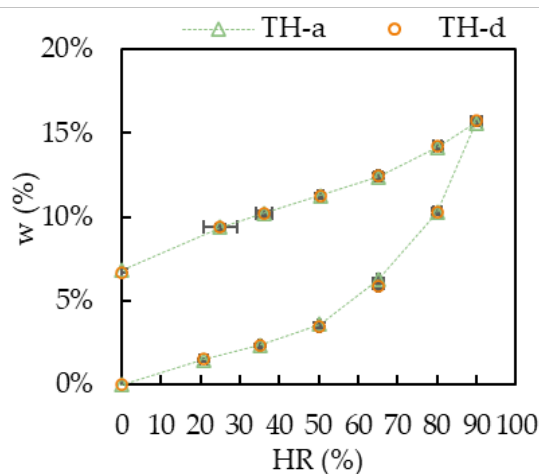
	TH-a	TH-d
d (cm)	5,60 ± 0,01	5,59 ± 0,02
h (cm)	7,52 ± 0,15	5,35 ± 0,13
$\rho_{app, sec}$ (kg/m <sup>3</sup> )	425,2 ± 7,3	395,0 ± 13,8

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Isothermes de sorption

La FIGURE 2 présente les branches d'adsorption principale et de désorption primaire obtenues à l'issue des stabilisations aux différents paliers pour les deux lots de TH. Chaque point présente la valeur moyenne et l'écart-type des teneurs en eau obtenues sur les 5 échantillons de chaque lot. Les résultats montrent la bonne reproductibilité des mesures. Pour TH-a, le coefficient de variation est compris entre 0.94 % et 5.92 % en adsorption et entre 1.07 % et 2.52 % en désorption. Pour TH-d, il est compris entre 1.22 % et 1.71 % en adsorption et entre 1.28 % et 1.96 % en désorption.

Les isothermes de sorption obtenues pour les 2 lots sont identiques. Il n'y a donc pas d'effet d'anisotropie du fait que les points d'équilibre dépendent de la structure porale et non des chemins de transfert.



**FIGURE 2. Isothermes d'adsorption principales et de désorption primaires de TH-a et TH-d, moyenne et écart-type des 5 échantillons**

La courbe d'adsorption du matériau TH présente deux points d'inflexion, situés entre 0 et 20 %HR et entre 50 et 65 %HR. Les isothermes de ce matériau pourraient être classés comme de type II ou IV (Lykiema et al. 1984). De manière générale, les matériaux à base de chanvre présentent une forme de courbe sigmoïde, correspondant aux types II ou III. Cette forme est attribuée à la présence d'une porosité macroscopique dans le matériau, où l'humidité est capturée par un processus d'adsorption monomoléculaire, suivi d'une adsorption polymoléculaire, ainsi que par une condensation capillaire, qui dépend de la taille des pores.

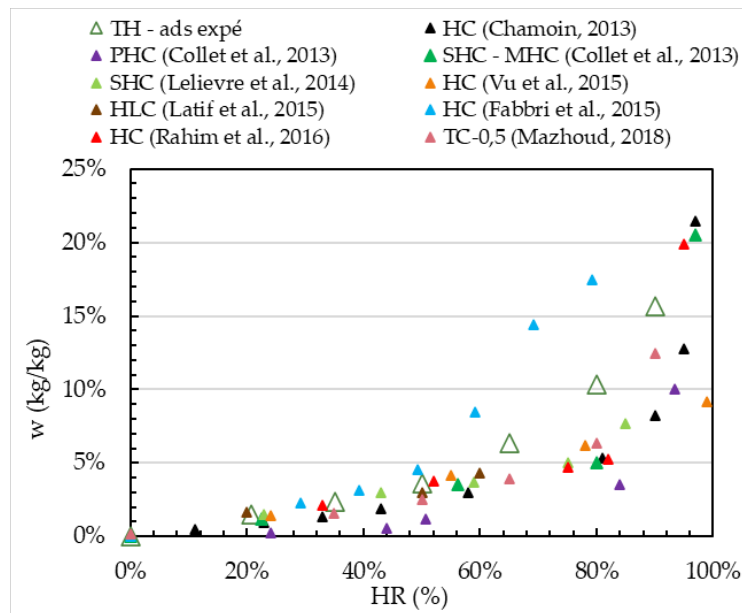
La courbe d'adsorption de TH est similaire à celles de la littérature jusqu'à 50 %HR (FIGURE 3). Elle se rapproche des résultats obtenus pour des bétons de chanvre moulés ou projetés, de formulation comparable (C/L entre 0,44 et 0,65) et de masse volumique comprise entre 430 et 478 kg/m<sup>3</sup> ((Collet et al. 2013), (Lelievre, Colinart, et Glouannec 2014) et (Rahim et al. 2016).

Les principales caractéristiques de ces matériaux sont résumées dans le **TABLEAU 2**.

Au-delà de 50 %HR, le matériau TH présente une teneur en eau supérieure à la plupart des résultats de la littérature, excepté Fabbri et al. (2015). Ces écarts sont attribués à la fois au dosage en chanvre, au type de liant et à la mise en œuvre des matériaux. En effet, (Mazhoud et al. 2021) montrent que, pour un même liant et une mise en œuvre par compactage avec la même pression, lorsque le dosage en chanvre augmente, la teneur en eau augmente. Les bétons de chanvre de Collet, Lelievre, Chamoin, Mazhoud et Rahim, malgré des dosages en chanvre similaires à ceux de cette étude, montrent des teneurs en eau plus faibles. Le matériau de Latif (2015), avec un rapport C/L de 0,9 et une masse volumique plus faible, montre également une teneur en eau plus faible alors que dans le cas de Fabbri (2015), le dosage en chanvre est plus faible et conduit à une teneur en eau plus élevée. Ainsi, outre l'effet du dosage en chanvre, le type de liant et le mode de mise en œuvre impactent les isothermes de sorption des bétons de chanvre.

**TABLEAU 2.** Formulation, masse volumique et mise en œuvre de bétons de chanvre issus de la littérature.

Références	Formulation (Chanvre/Liant)	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Mise en œuvre
Collet et al. 2013	0,65	460	Béton de chanvre préfabriqué
	0,50	430	Béton de chanvre projeté
Lelievre et al. 2014	Non spécifiée	450	Béton de chanvre projeté
Chamoin, 2013	0,50	440	Béton de chanvre projeté
Latif et al. 2015	0,9	290	Coulé dans un moule bois 400×400×120 mm, subdivisé en 16 blocs de 98×98×120 mm par cloisons en carton (2 mm)
Vu et al. 2015	Non spécifiée	453	Blocs préfabriqués (SEAC, Toulouse)
Fabbri et al. 2015	0,33	504	Compactage dans un coffrage 0,9×0,9×0,11 m <sup>3</sup> en 8 couches successives
Rahim et al. 2016	0,44	478	Remplissage manuel des moules avec compactage pour éviter les vides
Mazhoud, 2018	0,50	508	Placement en 4 couches successives, compactées à 0,1 MPa (moules cylindriques)



**FIGURE 3.** Comparaison d'isothermes d'adsorption de matériaux à base de chanvre de la littérature avec TH

Pour TH, les courbes d'adsorption principales et de désorption primaires ne se superposent pas, ce qui indique la présence d'un phénomène d'hystérésis. À une humidité relative de 50 %HR, l'écart observé est de 7,67 % entre les deux courbes lors de la désorption à partir de 90 %HR. Cette hystérésis est supérieure à celles observées dans la littérature bien que la désorption soit réalisée à partir d'une HR plus basse ici que dans la littérature. Selon Collet et al. (2013), en désorbant à partir de 97 %HR, l'écart entre la branche d'adsorption et la branche de désorption à 50 %HR est de 4 % pour le SHC (béton de chanvre projeté) et le MHC (béton de chanvre moulé), et de 3 % pour le PHC (béton de chanvre préfabriqué). Dans Łapka et al. (2023), l'ouverture de l'hystérésis à 50 %HR est de 2,3 % sur la teneur en eau. Bennai et al. (2022) ont constaté un écart de 6 %HR à 50 %HR pour le béton de chanvre en désorbant de 97 %HR.

#### B. Cinétiques de sorption

L'étude des cinétiques de sorption a pour objectif de compléter l'analyse des propriétés de stockage, identifiées par les points de stabilisation, avec les propriétés de transfert, qui régissent le régime transitoire.

Les FIGURE 4 et FIGURE 5 présentent les cinétiques de sorption des lots TH-a et TH-d. Comme précédemment, les résultats sont très reproductibles entre les différents échantillons d'un même lot. Les temps de stabilisation sont compris entre 8 jours aux plus faibles humidités relatives et 19 semaines aux plus fortes. Les évolutions pour les différents paliers, sont comparables pour les deux lots avec toutefois une différence notable les premiers jours consécutifs au changement de consigne. Les échantillons ont été conçus pour que la distance parcourue entre la surface d'échange et le cœur de l'échantillon soit identique. Toutefois, l'aire de la surface d'échange,  $A$ , est différente.

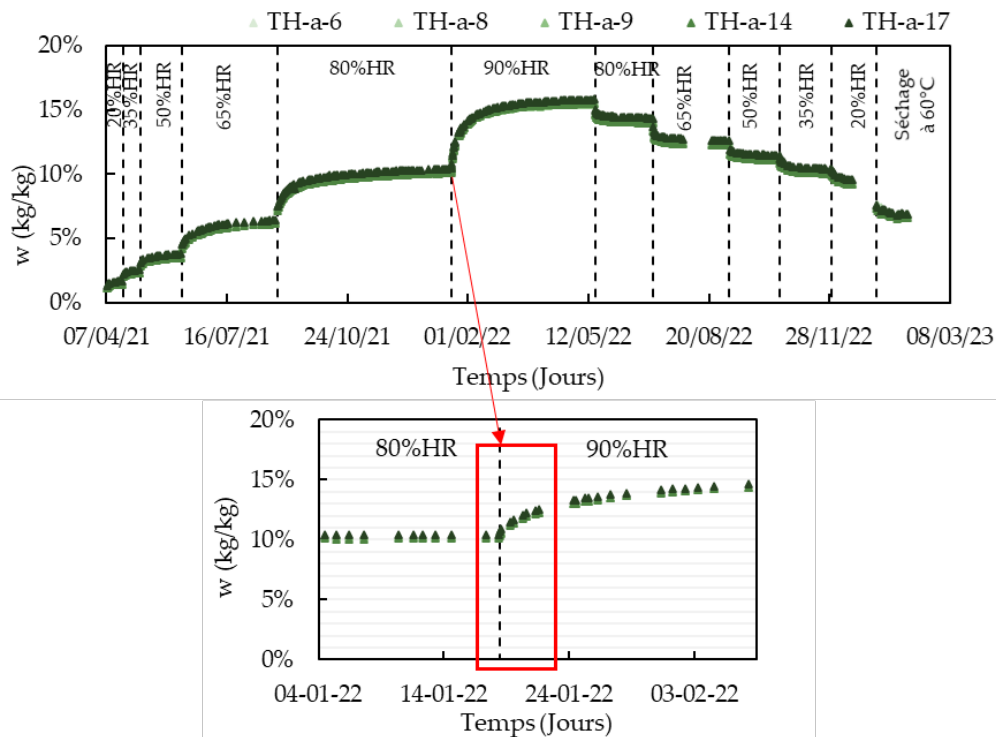


FIGURE 4. Cinétiques d'adsorption, de désorption et de séchage du lot TH-a

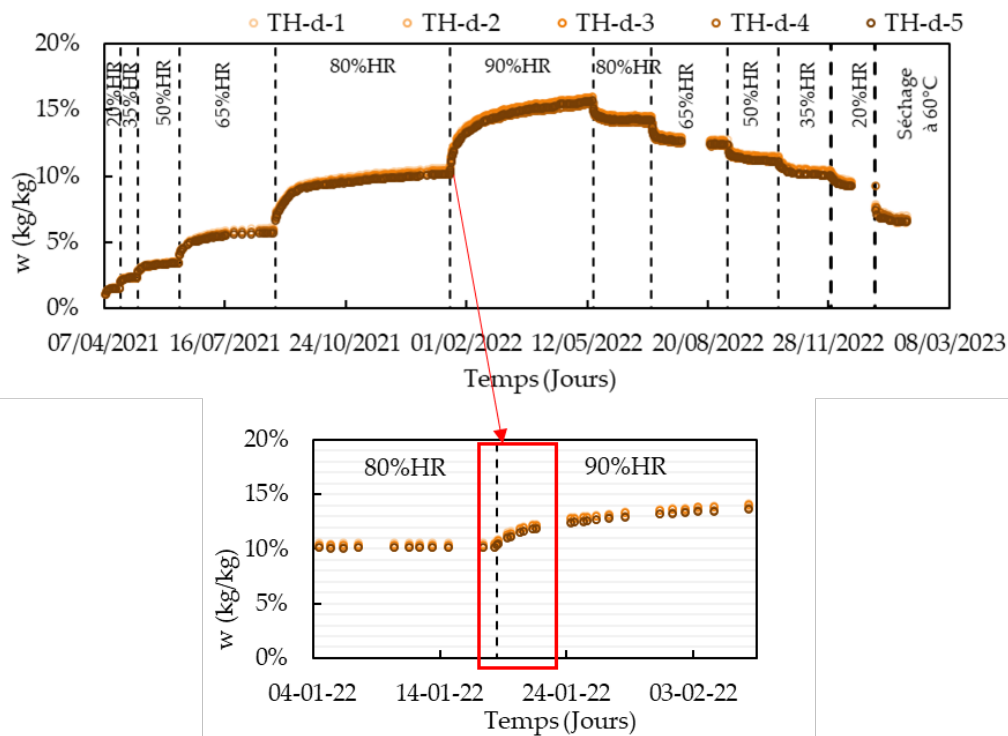


FIGURE 5. Cinétiques d'adsorption, de désorption et de séchage du lot TH-d

Afin de les comparer, les cinétiques des deux lots sont alors rapportées à cette aire A (FIGURE 6). Les valeurs de  $w/A$  du lot TH-d sont supérieures à celles du lot TH-a du fait de la configuration géométrique, et donc d'une surface d'échange plus faible. Les coefficients de diffusion calculés sur les trois premières pesées consécutives au changement de consigne sont répertoriés FIGURE 7 pour les deux lots. Comme attendu, en phase d'adsorption, les coefficients de diffusion augmentent lorsque l'humidité augmente. Les coefficients obtenus pour le lot TH-d sont systématiquement plus élevés que ceux du lot TH-a, avec des rapports de 2,3 à 4,4. Même si TH-d présente une masse volumique plus faible, ce qui le rend plus perméable au transfert hygrique, cela ne peut expliquer le rapport entre les coefficients de diffusion de chaque lot. Ainsi, un effet d'anisotropie marqué est donc observé. Toutefois ce résultat est à l'opposé des attendus, la géométrie cylindrique et l'orientation des chènevottes étant supposées favoriser le transfert radial. Il semble donc que l'orientation des chènevottes ne contribue pas à favoriser le transfert d'humidité. L'effet du compactage sur l'orientation des chènevottes peut être limité celles-ci ne seraient pas totalement perpendiculaires à la direction de compactage.

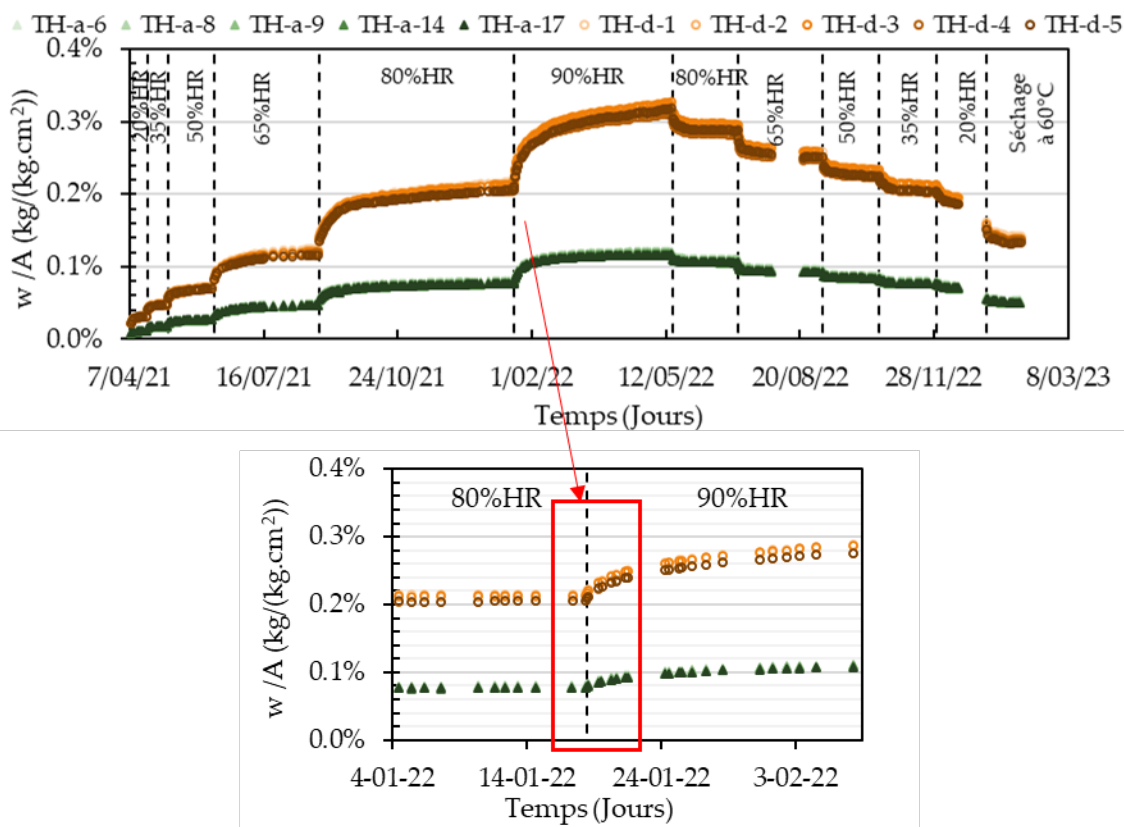


FIGURE 6. Cinétiques de teneur en eau rapportée à la surface d'échange A pour TH-a et TH-d

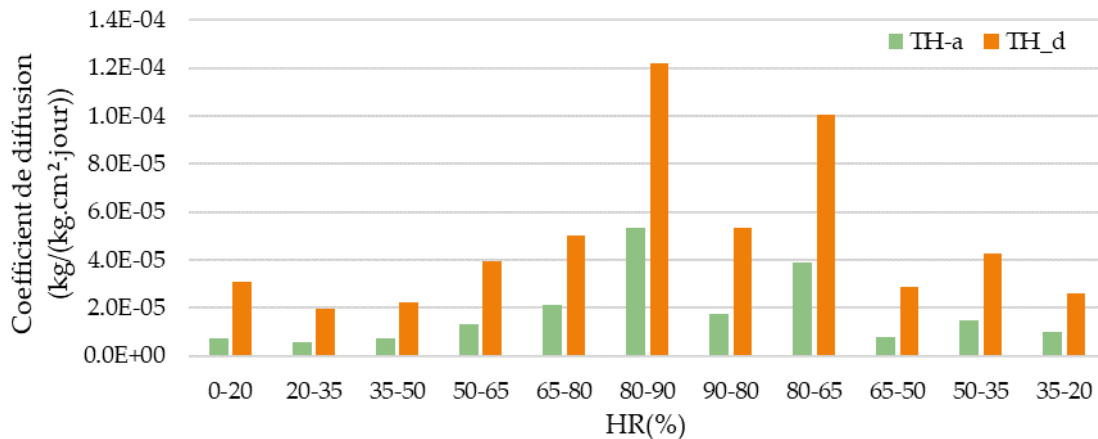


FIGURE 7. Coefficient de diffusion  $w/(A*t)$  pour les lots TH-a et TH-d

#### IV. CONCLUSION

Les deux lots d'échantillons produits pour étudier l'effet du compactage sur le comportement hygrique du béton de chanvre en fonction de la direction de sollicitation présentent des masses volumiques comparables. Les isothermes de sorption mesurées sont identiques pour les deux lots, aussi bien en adsorption qu'en désorption. En effet, celles-ci sont principalement influencées par la nature chimique et physique du matériau. Les cinétiques de sorption, quant à elles, mettent en évidence un comportement anisotrope du béton de chanvre vis-à-vis du transfert d'humidité, avec des coefficients de diffusion plus élevés dans le cas de transferts unidirectionnels, orientés selon la direction de compactage, que dans le cas de transferts radiaux, perpendiculaires à cette direction. Ce résultat s'avère contre-intuitif, il peut s'expliquer par le fait que le compactage n'oriente peut-être pas totalement les chènevottes dans une direction perpendiculaire à la direction de compactage.

Afin d'approfondir l'analyse, il serait intéressant de quantifier l'anisotropie physique des échantillons, par des méthodes d'analyse d'image par exemple. En effet, outre l'orientation des chènevottes, le compactage peut avoir un effet sur la déformation des pores, leur distribution et la modification de la tortuosité. Par ailleurs, les propriétés mécaniques et la conductivité thermique, bien qu'importantes, ne font pas partie du périmètre de cette étude. Leur analyse pourrait néanmoins constituer un prolongement pertinent dans le cadre de travaux futurs.

#### REFERENCES

Amziane, S., Collet, F., et Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M.,. 2017. « Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. », 2017. Mater Struct 50, 167. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>.

Bennai, Fares, Mohammed Yacine Ferroukhi, Ferhat Benmahiddine, Rafik Belarbi, et Armelle Nouviaire. 2022. « Assessment of Hygrothermal Performance of Hemp Concrete Compared to Conventional Building Materials at Overall Building Scale ». Construction and Building Materials 316 (janvier):126007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126007>.

Brzyski, Przemysław, Piotr Gleń, Mateusz Gładcki, Monika Rumińska, Zbigniew Suchorab, et Grzegorz Łagód. 2021. « Influence of the Direction of Mixture Compaction on the Selected Properties of a Hemp-Lime Composite ». *Materials* 14 (16): 4629. <https://doi.org/10.3390/ma14164629>.

Chamoin, Julien. s. d. « Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation ».

Collet, Florence, Julien Chamoin, Sylvie Pretot, et Christophe Lanos. 2013. « Comparison of the Hygric Behaviour of Three Hemp Concretes ». *Energy and Buildings* 62 (juillet):294-303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.

Fabbri, Antonin, Pierre-Antoine Chabriac, Dac Thuong Ngo, Frederic Sallet, Emmanuel Gourdon, Henry Wong, et Jean-Claude Morel. 2015. « « Hygrothermal behaviour of hemp concrete; experimental evidences and modelling » », 2015.

Latif, Eshrar, Mike Lawrence, Andy Shea, et Pete Walker. 2015. « Moisture Buffer Potential of Experimental Wall Assemblies Incorporating Formulated Hemp-Lime ». *Building and Environment* 93 (novembre):199-209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>.

Relievre, D., T. Colinart, et P. Glouannec. 2014. « Hygrothermal Behavior of Bio-Based Building Materials Including Hysteresis Effects: Experimental and Numerical Analyses ». *Energy and Buildings* 84 (décembre):617-27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.013>.

Lykiema, J, K S W Sing, J Haber, M Kerker, E Wolfram, J H Block, N V Churaev, et al. 1984. « Prepared for Publication by the Subcommittee on Reporting Gas Adsorption Data Consisting of K. S. W. SING (UK, Chairman); D. H. EVERETT (UK); R. A. W. HAUL (FRG); L. MOSCOU (Netherlands); R. A. PIEROTTI (USA); J. ROUQUEROL (France); T. SIEMIENIEWSKA (Poland) ».

Mazhoud, Brahim. 2018. « Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés », 2018.

Mazhoud, Brahim, Florence Collet, Sylvie Prétot, et Christophe Lanos. 2021. « Effect of Hemp Content and Clay Stabilization on Hygric and Thermal Properties of Hemp-Clay Composites ». *Construction and Building Materials* 300 (septembre 2021): 123878., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123878>.

« NF EN ISO: 12571, « Détermination des propriétés de sorption hygroscopique » ». 2021, 2021.

Nguyen, Tai Thu, Vincent Picandet, Patrick Carre, Thibaut Lecompte, Sofiane Amziane, et Christophe Baley. 2010. « Effect of Compaction on Mechanical and Thermal Properties of Hemp Concrete ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14 (5): 545-60. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>.

Rahim, M., O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, et T. Langlet. 2016. « Characterization and Comparison of Hygric Properties of Rape Straw Concrete and Hemp Concrete ». *Construction and Building Materials* 102 (janvier):679-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.

Vu, T L, S Spagnol, et C Magniont. 2015. « EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYGROTHERMAL BEHAVIOUR OF HEMP SHIVES-BASED PRECAST BLOCKS AT MATERIAL AND WALL SCALES ».

Williams, Joseph, Mike Lawrence, et Pete Walker. 2017. « The Influence of the Casting Process on the Internal Structure and Physical Properties of Hemp-Lime ». *Materials and Structures* 50 (2): 108. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0976-4>.