

ETUDE COMPARATIVE MULTI-ECHELLE DES PERFORMANCES HYGRIQUES DU BETON DE CHANVRE ET DU BETON CELLULAIRE

Fathia Dahir Igue^{*a}, Anh Dung Tran Le^a, Driss Samri^b, Lorena Freitas Dutra^a, Geoffrey Promis^a, Omar Douzane^a, Laurent Lahoche^a, Thierry Langlet^a

^aLaboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne, Avenue des Facultés, 80025 Amiens Cedex 1, France

^bCentre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 24 rue Joseph Fourier 38400 Saint-Martin-D'Hères, France

* fathiaraho@yahoo.fr

RÉSUMÉ. Le béton de chanvre est un matériau biosourcé répondant parfaitement aux attentes de la future réglementation environnementale. Intégré à l'enveloppe du bâti, il permet de réguler passivement et efficacement l'humidité intérieure du bâtiment grâce à sa capacité tampon hydrique, tout en assurant une isolation thermique efficace. L'objectif de cet article est d'étudier et de comparer les performances hygriques du béton de chanvre avec le béton cellulaire, couramment utilisé dans la construction. Une comparaison multi-échelle (de l'échelle microscopique à l'échelle de la paroi et du local) sera présentée pour mieux comprendre les performances du béton de chanvre et du béton cellulaire. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur les résultats expérimentaux couplés à une simulation numérique.

Mots Clés: béton de chanvre, béton cellulaire, étude multi-échelle, capacité tampon hygrique, performance hygrique.

ABSTRACT. Hemp concrete is a bio-based material that perfectly meets the expectations of future environmental regulations. Integrating this material into the building envelope allows passive and effective regulation of the indoor relative humidity of the building thanks to its moisture buffering capacity, while ensuring efficient thermal insulation. The aim of this article is to study and compare the hygric performance of hemp concrete with the one of aerated autoclaved concrete, commonly used in buildings. A multi-scale comparison (from the microscopic scale to the wall and room scales) will be presented to better understand the performance of hemp concrete and aerated concrete. This study is based on the experimental results found in the literature and a numerical simulation.

Keywords: hemp concrete, aerated concrete, multi-scale study, moisture buffering capacity, hygric performance

NOMENCLATURE

A	Surface exposée	m ²	h _r	Coefficient d'échange convectif	W . m ⁻² . K ⁻¹
A _k	Surface exposé de l'élément k	m ²	HIR*	Capacité tampon hygrique normalisée	$\frac{g \cdot m^3}{\%HR \cdot h}$
C _l	Chaleur spécifique de l'eau	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	L _v	Chaleur latente de vaporisation	J.kg ⁻¹
D _T	Coefficient de transport de masse de l'eau liée à un gradient de température	m ² .s ⁻¹ .K ⁻¹	MBV _k	Capacité tampon hygrique du matériau k	$\frac{g \cdot m^3}{\%HR \cdot h}$
D _{T,v}	Coefficient de transport de la vapeur lié à un gradient de température	m ² .s ⁻¹ .K ⁻¹	P _{ve}	Pression partielle de vapeur extérieure	Pa
D _θ	Coefficient de transport de masse d'eau associé à un gradient en humidité volumétrique	m ² .s ⁻¹	T	Température	K
D _{θv}	Coefficient de transport de masse de la vapeur d'eau associé à un gradient en humidité volumétrique	m ² .s ⁻¹	t	Temps	s
G _{vp}	Source de vapeur d'eau	kg.s ⁻¹	V	Volume du local	m ³
h _M	Coefficient d'échange massique	m ⁻¹ .s ⁻¹	x	Abscisse	m
			θ	Teneur en eau volumique	m ³ .m ⁻³
			HR	Humidité relative	%

1. INTRODUCTION

Afin de limiter l'impact du secteur du bâtiment sur l'environnement, la communauté scientifique a eu recours à des matériaux à faible impact environnemental répondant aux normes de la réglementation thermique et garantissant une santé, un confort et une ambiance interne agréable au sein de l'habitat. Des nombreuses recherches ont été effectuées sur les matériaux biosourcés tels que le chanvre, le lin, le colza, etc. Ces études scientifiques ont montré que ces matériaux sont une bonne réponse face aux préoccupations environnementales mais aussi à la réglementation thermique. Un des matériaux biosourcés les plus utilisés est le béton de chanvre. Cet article porte sur une étude comparative des performances du béton de chanvre avec celles du béton cellulaire autoclavé (AAC), largement utilisé dans le domaine du bâti. De nombreux auteurs montrent que le béton de chanvre possède une excellente capacité tampon hygrique et une bonne isolation thermique (Collet 2004 ; Cérezo 2005 ; Samri 2008 ; Tran Le 2010 ; Rahim, 2016). Le béton cellulaire autoclavé est un matériau silico-calcaire et constitue uniquement des matières premières minérales. Actuellement, il est recommandé pour ses performances thermique et mécanique (Fudge 2019).

Dans cet article, une vue d'ensemble (origine, composition, propriétés, etc.) de deux bétons sera présentée et comparée à différentes échelles (micro et macro). Puis, la performance hygrique à l'échelle d'une paroi et du local en béton de chanvre et béton cellulaire sera comparée en s'appuyant sur les simulations numériques.

2. ORIGINE, NATURE, USAGE ET COMPOSITION DU BETON DE CHANVRE ET DU BETON CELLULAIRE

Le chanvre est une plante vasculaire, de nom botanique « *Cannabis Sativa* ». Elle est originaire de l'Asie Centrale et est cultivée depuis des milliers d'années avant J.C. Le « *Cannabis Sativa* » est une plante renouvelable utilisée sous forme de type de coproduit (résidus de la plante) dans le domaine de la construction autant que murs, toits, planchers, etc. C'est un matériau biosourcé similaire aux bois, sa composition chimique est en majorité de la cellulose, d'hémicellulose, de la lignine et des faibles teneurs en pectine, protéine, cire et cendre (Garcia-Jaldon 1995). Le béton de chanvre étudié dans cet article est obtenu à partir des particules chènevottes, du liant PF70 et de l'eau. Il existe plusieurs types de formulations et celles-ci diffèrent par le dosage effectué lors du mélange en matrice liant et chènevottes. La chaux PF70 est un liant préformulé à base de chaux aérienne (75%), de liants hydrauliques (15%) et pouzzolanique (10%).

Le béton cellulaire est mis en processus en 1880 par un chercheur allemand, Michaelis qui a obtenu un brevet sur ses procédés de durcissement du béton cellulaire à la vapeur. Il est un matériau majoritairement composé des matières minérales tels que : 65% de sable fin de silice, 20% de ciment hydraulique, 15% de la chaux, 1% de gypse, 0.05% des agents expansifs (poudre ou pâte d'aluminium finement broyé) et de l'eau (Fudge et al. 2019).

3. PROPRIETES MICROSCOPIQUES, MECANIQUES ET HYGROTHERMIQUES DU BETON DE CHANVRE ET DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE

La chènevotte (ou bois de chanvre) provient du cœur de la tige de chanvre dont la longueur et le diamètre varient en fonction du milieu environnemental. Les paramètres physiques de la chènevotte (tels que: sa microstructure cellulaire, la distribution de la taille des pores et sa masse volumique) ont été étudiés par plusieurs auteurs. En ce qui concerne le classement des pores, ils sont classés par tailles [IUP, 1994]: macropores (diamètre supérieur à 50 nm); mésopores (diamètre compris entre 2 et 50 nm) et micropores (diamètre inférieur à 2nm). La chènevotte a une microstructure similaire aux bois durs avec une porosité ouverte totale importante de l'ordre de 80%. Cette forte porosité est due à la structure tubulaire (figure 1) de la tige du chanvre ainsi que la porosité inter-particules accentuant

l'interconnexion des capillaires. Le diamètre du réseau capillaire de la particule chènevotte est compris entre 10-50 μm et elle présente aussi une anisotropie structurale (Nguyen 2010 ; Collet 2004 ; Cézeo 2005).

Le liant PF70 est un matériau poreux présentant une porosité de 50% à l'état sec. Sa microstructure compose plusieurs types de pores de tailles mésoscopiques et microscopiques. Les pores de tailles 0.01-5 μm correspondant aux espaces entre les silicates hydratés CSH (figure 1.c.), et les pores de tailles 5-100 μm sont des mésopores dus à l'hétérogénéité du liant. La microstructure du béton de chanvre dépend de la structure de sa composition (chènevotte et liant), de la proportion de ces composites lors de la formulation et de la méthode de fabrication. Le béton de chanvre est un matériau très poreux, qui combine à la fois la microporosité des granulats végétaux et du liant plus la macroporosité due à l'arrangement imparfait des particules chènevottes. Il présente trois types de pores, des pores macroscopiques dus à l'arrangement imparfait des particules chènevottes (figure 1.d.), des mésopores dus au liant et les pores microscopiques des particules végétales chènevottes et du liant PF70. Selon Collet (2004), le béton de chanvre est un matériau macroporeux dont le diamètre médian des pores est de l'ordre de 0,69 μm et le volume des pores de la famille principale ($0,18 < dp < 4,53 \mu\text{m}$) représente 70 % du volume total des pores accessibles. La porosité totale du béton de chanvre, déterminée par la méthode de pycnomètre, est de l'ordre de 76% (Collet 2004 ; Cézeo 2005; Nguyen 2010).

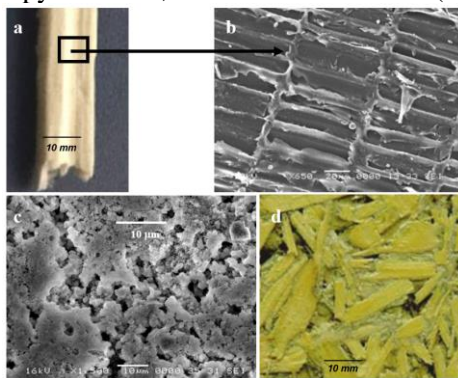


Figure 1 : Images à différentes échelles du béton de chanvre.

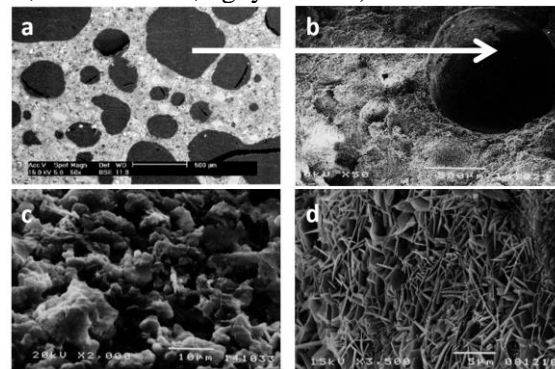


Figure 2 : Images à différentes échelles du béton cellulaire

Le béton cellulaire est un matériau avec une porosité importante et une large distribution des pores. La matrice poreuse solide présente deux types de pores : des macropores fermés et isolés de géométrie sphérique et de diamètre de 60 à 500 μm , constituent la surface du matériau (figures 2.a.b.) ; des pores de géométrie cylindrique dont le diamètre est inférieur 60 μm . Les pores dont le diamètre est entre 50nm-50 μm se situent entre les grains (figures 2.c.) tandis que les pores dont le diamètre est inférieur à 50nm se situent entre les particules (figure 2.d.). Plusieurs auteurs ont fait l'objet d'étude sur la microstructure du béton cellulaire autoclavé afin de pouvoir déterminer le pourcentage des micropores dont le diamètre est inférieur à 60 μm sur la porosité totale du matériau. Ces études ont déduit que les micropores ayant un diamètre inférieur à 60 μm présentent un pourcentage moyen de 25% de la porosité totale du matériau, pour une masse volumique apparente entre 300-500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, d'où les macropores (diamètre supérieur à 60 μm) présentent 75% de cette dernière (Mostafa 2005).

Le tableau 1 résume les propriétés de deux bétons trouvés dans la littérature. La comparaison montre que le béton de chanvre est plus fragile et plus isolant que le béton cellulaire. Comparé au béton cellulaire, les propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre sont très anisotropiques et dépendent de sa masse volumique, de l'humidité relative environnante et du facteur d'anisotropie dû à

l'orientation des particules végétales chènevottes au sein du matériau et de la forme des pores (Boutin 1996 ; Cérezo 2005 ; Tran. Le et al. 2019). Le tableau 1 montre que le facteur de la résistance à la vapeur du béton de chanvre est plus faible par rapport à celle du béton cellulaire et ceci peut s'expliquer par le fait que le béton chanvre possède une porosité ouverte plus importante que celle du béton cellulaire. La figure 3 montre les courbes d'isotherme de sorption du béton de chanvre et du béton cellulaire. On peut remarquer que, comparé au béton cellulaire, la teneur en eau volumique du béton de chanvre est très similaire dans la zone d'adsorption monocouche et plus élevée dans la zone d'adsorption multicouche et condensation capillaire.

	Béton de chanvre	Béton cellulaire autoclavé
Masse volumique sèche (ρ_0) en kg/m ³	317	462,4
Porosité totale	76%	84%
Porosité ouverte	74%	65%
Résistance mécanique R en MPa	0,35 – 0,80	3
Conductivité thermique sèche λ_0 en W/ (m.K)	0,082	0,11
Chaleur massique sèche C_0 en J/ (kg.K)	1000	850
Facteur de résistance à la diffusion μ	7,8	8,3

Tableau 1 : Propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre et du béton cellulaire.

Sachant que la performance hygrique est un des objectifs recherchés dans la conception des bâtiments, dans la partie suivante, nous allons nous concentrer sur l'impact de l'utilisation de ces matériaux sur la variation de l'humidité relative intérieure d'un local.

4. MODEL NUMERIQUE ET PRESENTATION DES CAS ETUDIÉS

4.1. MODELE DU TRANSFERT HYGROTHERMIQUE A L'ECHELLE D'UNE PAROI SIMPLE

Dans cet article, nous allons utiliser le modèle basé sur la théorie de Philip et De Vries (1957) et modifié par Mendes et al.1997. Ce modèle peut être décrit par les équations (1) à (7). L'équation bilan d'humidité est écrite sous la forme:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

L'équation du bilan de la chaleur indique que la variation d'énergie en fonction du temps est liée à la fois à la chaleur échangée par conduction ainsi qu'au changement de phase dans les pores :

$$\rho_0 C p_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (2)$$

$$C p_m = C p_0 + C p_1 \frac{\rho_l}{\rho_0} \theta \quad (3)$$

Les conditions aux limites (en $x = 0$, ambiance extérieure et $x = L$, ambiance intérieure) deviennent:

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) \quad (4)$$

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=L,i} = h_{M,i} (\rho_{ve,s,i} - \rho_{ve,a,i}) \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - L_v \rho_l \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - L_v \rho_l \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=L,i} = h_{T,i} (T_{s,i} - T_{a,i}) + L_v h_{M,i} (\rho_{ve,s,i} - \rho_{ve,a,i}) \quad (7)$$

4.2. MODELE DE LA CAPACITE EFFECTIVE (EFFECTIVE CAPACITANCE MODEL)

Le modèle de la capacité effective permet d'évaluer l'impact d'utilisation des matériaux sur la variation de l'humidité relative intérieure d'un local en utilisant les valeurs de la capacité tampon hygrique (MBV). Les paramètres comme le taux de ventilation, la source de vapeur, le temps d'exposition, la surface effective exposée, etc. sont aussi pris en compte dans le modèle. Les valeurs MBV utilisées dans ce modèle sont obtenues par les études expérimentales ou par la méthode numérique. On considère que la capacité tampon hygrique de la paroi est en équilibre avec les conditions de l'ambiance du local (Janssen et Roels 2009), l'équation bilan de conservation de la masse est établie par les équations (8) et (9) :

$$\left(\frac{V}{RT_i} + \frac{100HIR^*V}{P_{v,sat}(T_i)} \right) \cdot \frac{\partial P_{vi}}{\partial t} = (P_{ve} - P_{vi}) \cdot \frac{nV}{3600R_iT_i} + G_{vp} \quad (8)$$

$$HIR^* = \left(\sum_k A_k MBV_k \right) / V \quad (9)$$

Les équations de 1 à 9 ont été implémentées dans l'environnement de simulation SPARK (Simulation Problem Analysis and Research Kernel), un environnement de simulation permettant de résoudre de façon efficace les systèmes d'équations différentielles par la méthode de différence finies (Sowell et Haves 2001 ; Mendonça et al. 2002; Wurtz et al. 2006; Tran Le et al. 2010).

4.3. CAS ETUDIE A L'ECHELLE DE LA PAROI

Une étude numérique est réalisée sur une paroi simple couche d'épaisseur égale à 20cm pour le béton de chanvre et le béton cellulaire. L'objectif de cette étude est de déterminer la capacité tampon hygrique des matériaux étudiés. En ce qui concerne les conditions aux limites, une seule face de la paroi est perméable à la vapeur d'eau et les autres faces sont considérées imperméables, comme présente la Figure 4. Les coefficients d'échanges thermique et massique intérieurs ($h_{T,i}$, $h_{m,i}$) sont de $8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et 0.004 m.s^{-1} , respectivement.

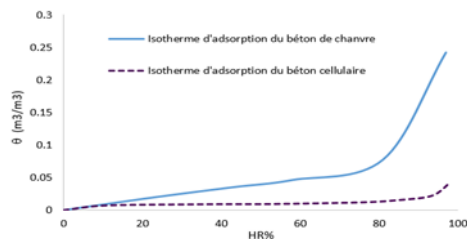


Figure 3 : Isotherme de sorption du béton de chanvre et béton cellulaire (Collet 2004 ; Feng, 2016).

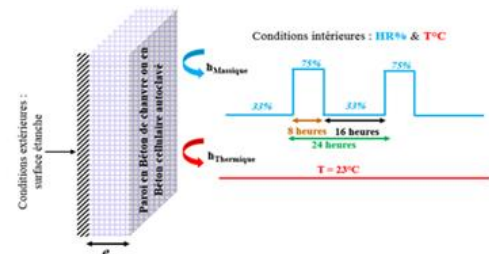


Figure 4 : Conditions des simulations de la paroi.

Les sollicitations en T et HR intérieures sont choisies selon le protocole Nordtest (Rode et al. 2005). La paroi est soumise à une température constante (23°C) et à une variation d'humidité relative (HR%) : 8 heures à 75% suivies de 16 heures à 33% (Figure 4). La performance hygrique de la paroi sera évaluée par la valeur de la capacité tampon hygrique qui est calculée à l'état d'équilibre en utilisant la formule suivante :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{\max} - HR_{\min})} \quad (10)$$

Avec : Δm est la variation de masse de l'échantillon (kg) ; HR_{\min} et HR_{\max} : les humidités relatives minimale et maximale (%HR) respectivement ; A : surface exposée (m^2).

4.4. CAS ETUDIE A L'ECHELLE DU LOCAL

Pour étudier l'impact des matériaux sur la performance hygrique d'un local, le modèle de la capacité effective présenté ci-dessus est utilisé. Les dimensions géométriques du local sont de $4 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$. Une surface effective de 42 m^2 est considérée (la toiture et le plancher bas sont considérés comme imperméable à la vapeur d'eau). La chambre est occupée par deux personnes de 22h00 à 7h00 avec un taux de ventilation de 0.5 l/h . Les valeurs de la capacité tampon hygrique obtenues par la simulation à l'échelle de la paroi sont utilisées pour effectuer ces simulations.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A l'échelle de la paroi, les courbes de variation de masse à l'état d'équilibre du béton cellulaire autoclavé et du béton de chanvre sont représentées sur la figure 5. On remarque que l'évolution de masse suit la variation de l'humidité relative intérieure du au phénomène de sorption. En utilisant ces résultats et l'équation (10), les valeurs de la capacité tampon hygrique (MBV) de deux matériaux sont calculées et présentées sur la figure 6. La comparaison entre les valeurs numériques obtenues ($\text{MBV}_{\text{CELLULAIRE}} = 1,02 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$ et $\text{MBV}_{\text{CHANVRE}} = 2,02 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$) et les valeurs expérimentales trouvées dans la littérature montre un très bon accord. En ce qui concerne le béton cellulaire autoclavé, les valeurs MBV expérimentales ont été mesurées par les trois laboratoires (en Danemark, Finlande et Suède) dans le cadre du projet NordTest (Rode et al. 2005). Les valeurs obtenues sont de $1,11$; $0,96$ et $1,05 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$, respectivement. La valeur MBV recommandée pour le béton cellulaire dans le projet Nordtest est de $1,05 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$ comparée à $1,02 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$ obtenue dans notre étude. Concernant le béton de chanvre, la valeur MBV numérique ($2,02 \text{ g.m}^{-2}.\% \text{HR}^{-1}$) est très cohérente avec les valeurs expérimentales obtenues par les autres auteurs (Tran Le 2010 ; Collet et al, 2012 ; Rahim et al, 2016). Selon la classification de la capacité tampon hygrique des matériaux dans le projet Nordtest (Rode et al. 2005), on constate que la capacité tampon hygrique du béton de chanvre est classée comme excellente tandis que le béton cellulaire autoclavé est classée comme modérée. Les résultats obtenus peuvent être expliqués par le fait que, comparé au béton cellulaire qui présente une microstructure ayant des pores fermés et isolés, les particules végétales constituant le béton de chanvre ont une structure tubulaire avec des pores interconnectés très perméable à la vapeur d'eau.

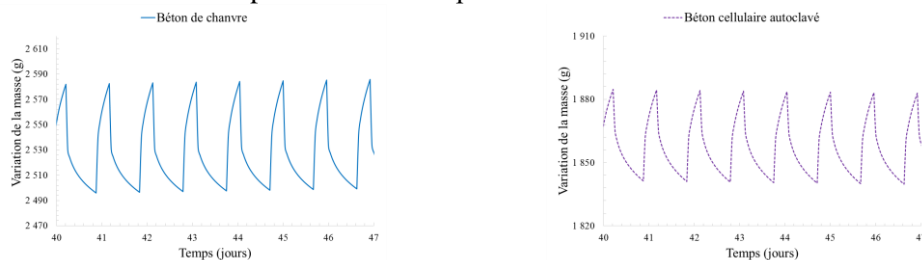


Figure 5 : Variation de la masse de l'échantillon

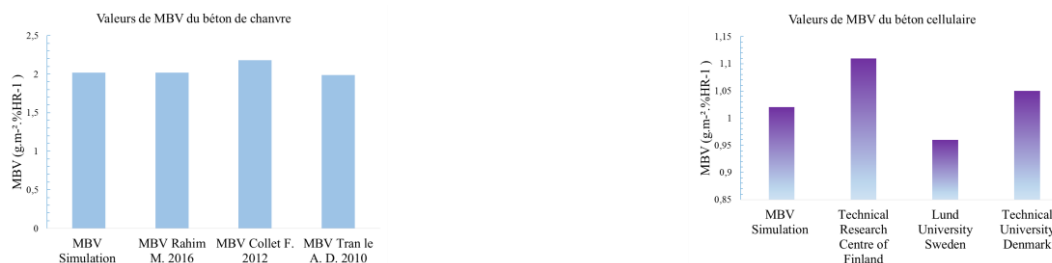


Figure 6 : Valeurs de la capacité tampon hygrique (numériques et expérimentales).

A l'échelle du local, la figure 7 montre les résultats de l'étude comparative de l'influence de la valeur MBV sur l'humidité relative intérieure du local. A l'équilibre, les courbes sont périodiques et la masse varie en fonction de la période d'occupation du local. En outre, l'impact de la valeur MBV sur

l'amplitude de variation de l'humidité relative intérieure du local est significatif. Pour un local dont l'inertie hygrique des parois est nulle ($MBV=0$), l'amplitude ($A_{MBV=0}$) est de 44.6% comparée à 7.4% et à 15% pour le béton de chanvre et le béton cellulaire, respectivement. Ces résultats montrent que l'utilisation des matériaux biosourcés comme le béton de chanvre permet d'améliorer le confort hygrique du local en atténuant la variation de l'humidité relative intérieure.

Pour étudier l'influence d'autres paramètres sur le confort hygrique d'un local, une étude de sensibilité portant sur le taux de ventilation et la surface effective a été réalisée. Les résultats sont montrés sur les figures 8, 9 et le tableau 2. On peut noter que plus le taux de ventilation (n) est élevé, plus l'humidité relative maximale diminue car la quantité de vapeur d'eau évacuée par le système de ventilation est plus grande. Cependant son influence sur l'amplitude de variation de l'humidité relative intérieure est faible contrairement à l'influence de la surface effective comme montre la figure 9. On constate que plus la surface exposée augmente, plus l'amplitude de variation de l'humidité relative intérieure diminue et cela peut être expliqué par l'augmentation de la quantité de vapeur d'eau échangée entre la paroi et l'ambiance intérieure par le phénomène de sorption. Pour cette étude, l'utilisation d'une surface exposée de 20 m² en béton de chanvre ou 40 m² en béton cellulaire a le même impact sur l'amplitude de variation de l'humidité relative intérieure. Cependant, au-delà de 35m² et 48m² pour le béton de chanvre et le béton cellulaire respectivement, l'impact de l'augmentation de la surface effective sur l'humidité relative intérieure du local reste faible. Le résultat montre qu'une combinaison raisonnable entre la valeur MBV, la surface effective suffisante, le taux de ventilation permet d'optimiser le confort hygrique intérieur.

		n = 0.25	n = 0.5	n = 0.75	n = 1	n = 2
Sans MBV	HR min	0,52	0,5	0,5	0,5	0,5
	HR max	1	0,95	0,80	0,73	0,61
	Amplitude	0,24	0,22	0,15	0,11	0,06
Béton de chanvre	HR min	0,79	0,63	0,57	0,55	0,51
	HR max	0,88	0,71	0,66	0,63	0,58
	Amplitude	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Béton cellulaire	HR min	0,76	0,60	0,55	0,52	0,50
	HR max	0,92	0,75	0,69	0,66	0,60
	Amplitude	0,08	0,08	0,07	0,07	0,05

Tableau 2 : Influence du taux de ventilation sur l'humidité relative intérieure du local.

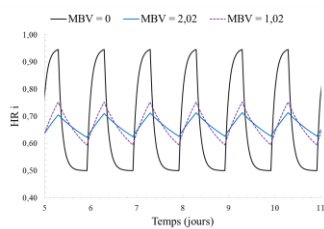


Figure 7 : Influence de la MBV

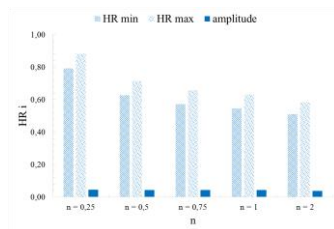


Figure 8: Influence du taux de ventilation

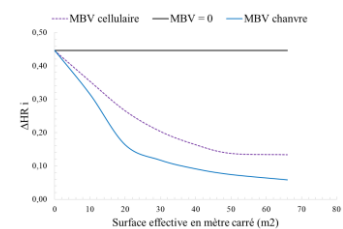


Figure 9 : Influence de la surface effective

6. CONCLUSION

Cet article présente une étude comparative multi-échelle sur les performances du béton de chanvre et du béton cellulaire autoclavé. Tout d'abord, une étude bibliographique (nature, structures poreuses, propriétés mécaniques et hygrothermiques) a été menée sur les deux matériaux. Puis une simulation numérique a été effectuée à l'échelle d'une paroi afin d'évaluer sa capacité tampon hygrique. Enfin, une étude numérique comparative et une étude de sensibilité des paramètres à l'échelle du local sont réalisées pour étudier l'impact des matériaux utilisés, la surface effective et le taux de ventilation sur l'humidité relative intérieure du bâti.

Les résultats montrent que le béton de chanvre est plus fragile et plus isolant que le béton cellulaire. Grâce à sa structure poreuse qui combine à la fois la microporosité des granulats végétaux et du liant plus la macroporosité due à l'arrangement des particules chènevottes, le béton de chanvre a des propriétés hygriques plus intéressantes que celles du béton cellulaire. Au niveau d'une paroi, la capacité tampon hygrique du béton de chanvre est classée comme excellente tandis que celle du béton cellulaire est classée comme modérée. A l'échelle du local, l'utilisation des matériaux biosourcés comme le béton de chanvre permet d'atténuer significativement la variation de l'humidité relative intérieure et d'améliorer le confort hygrique. Les résultats montrent que la valeur MBV, la surface effective et le taux de ventilation sont des paramètres clés pour optimiser la performance hygrique et nécessitent une combinaison raisonnable.

7. RÉFÉRENCES

- Boutin, C. 1996. « Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode auto-cohérente ». *Matériaux et Constructions* 29 (10):609-615. doi : 10.1007/BF02485968.
- Cerézo, V. 2005. « Propriétés mécanique, thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique ». Thèse MEGA-ENTPE. Lyon : INSA.
- Collet, F. 2004. « Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux ». Thèse. Rennes: INSA Rennes.
- Collet, F., Pretot, S. 2012. « Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete ». *Construction and Building Materials* 36 : 58-65. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139.
- Garcia-Jaldon C. 1995. « Caractérisation morphologie et chimique du chanvre (*cannabis sativa*), prétraitement à la vapeur et valorisation ». Thèse. Grenoble: Université Joseph Fourier.
- IUP, 1994. International Union of Pure and Applied Chemistry, "Recommendations for the characterization of porous solids", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 66, n°8, pp, 1739-1758, 1994
- Janssen, H., Roels, S. 2009. « Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures ». *Energy and Building* 41 (4) : 382-394. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.007.
- Mendes N., Ridley I., Lamberts R., Philippi P C., Budag K. 1997. « Umidus: A PC Program For The Prediction Of Heat And Mass Transfer In Porous Building Elements In ». *International Conference on Building Performance Simulation*.
- Mendonça, K.C., Inard, C., Wurtz, E., Winkelmann, F.C., Allard, F. 2002. «A zonal model for predicting simultaneous heat and moisture transfer in buildings». *Indoor Air, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*.
- Mostafa N. Y. 2005. « Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete ». *Cement and Concrete Research* 35: 1349– 1357. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.011.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K. 2000. « Structure and properties of aerated concrete: a review». *Cement & Concrete Composites* 22 : 321-329. doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0.
- Nguyen T.T. 2010. « Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre ». Thèse. Bretagne : Université de Bretagne Sud, France.
- Philip, J.R., De Vries, D.A. 1957. « Moisture movement in porous materials under temperature gradients ». *Transaction of American Geophysical Union* 38 (2): 222–232. doi.org/10.1029/TR038i002p00222.
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A.D., Promis, G., Langlet T. 2016. « Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete ». *Construction and Building Materials* 102: 679–687. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021.
- Rode, C., Peuhkuri, R., Lone, H., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K. « 2005. Moisture buffering of building materials ». *Nordic Innovation Centre Report: BYG-DTU R-126: 1601–2917*.
- Sowell, E.F., and Haves, P. 2001. « Efficient solution strategies for building energy system simulation ». *Energy and Buildings* 33: 309-317.
- Tran Le, Anh Dung. 2010. « Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous-titre: simulation numérique et approche expérimentale) ». Thèse de doctorat, Reims : Université de Reims Champagne-Ardenne.
- Tran Le, Anh Dung., Nguyen, S., T., Langlet T. 2019. « A novel anisotropic analytical model for effective thermal conductivity tensor of dry lime-hemp concrete with preferred spatial distributions ». *Energy and Buildings* 182: 75-87. doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.043.
- Wurtz, E., Haghghat, F., Mora, L., Mendonca, K.C., Maalouf, C., Zhao, H., Bourdoukan, P. 2006. «An integrated zonal model to predict transient indoor humidity distribution». *ASHRAE Transactions* 112 (2), 175-186.