

Béton de chanvre à l'échelle d'un local : effet de la dépendance des isothermes de sorption à la température

Georges COSTANTINE*, Chadi MAALOUF, Tala MOUSSA, Guillaume POLIDORI
GRESPI, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Université of Reims Champagne-Ardenne, Faculté des Sciences, BP. 1039, Moulin de la Housse, F-51687 Reims, Cedex 2.

*(auteur correspondant : georges.costantine@univ-reims.fr)

Résumé – Le béton de chanvre connaît depuis trois décennies un essor remarquable dans le secteur du bâtiment étant un contributeur efficace au confort hygrothermique. A l'échelle de la paroi, son comportement hygrothermique est toujours en cours d'investigation. Les dernières recherches ont montré l'importance de tenir en compte de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre dans la modélisation. Cependant, les études de cet aspect à l'échelle du local sont rares. Ce travail s'intègre alors dans ce cadre en prenant un local à enveloppe en béton de chanvre comme objet d'étude. La simulation numérique est menée sous l'outil SPARK pour différentes stratégies de ventilation (auto et hygroréglables).

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	w	teneur massique en eau, $kg.kg^{-1}$
I	inertie thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
P_{sat}	pression vapeur saturante, Pa	θ	teneur volumique en eau, $m^3.m^{-3}$
Q_m	débit massique de l'air, $kg.s^{-1}$	φ	humidité relative, [-]
q_{st}	chaleur isostérique de sorption, $J.kg^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
t	temps, s	ϕ	flux thermique, $W.m^{-2}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
x	distance, m	i	air intérieur
V	volume, m^3		

1. Introduction

Récemment, plusieurs défis économiques, sociologiques et environnementaux sont devenus les enjeux majeurs des chercheurs et scientifiques: des études récentes montrent que sept milliards de personnes sur la planète déploient l'équivalent d'une planète et demie de valeurs de ressources chaque année pour satisfaire leurs besoins. Avec la même cadence, la consommation d'énergie et de ressources minières aura triplé dans trente-cinq ans avec dix milliards d'habitants sur la Terre. Il est donc devenu primordial de s'interroger sur les matériaux de demain et en particulier ceux du secteur du bâtiment.

Désormais, une voie alternative en plein essor consiste à utiliser des matériaux issus de ressources renouvelables tels que les végétaux, parmi lesquels on peut citer le béton de chanvre. Cet agromatériau est obtenu en mélangeant de la chènevotte (partie intérieure broyée de la plante de chanvre) avec un liant minéral à base de chaux, de l'eau et d'éventuels adjuvants. La caractérisation du béton de chanvre a fait l'objet de plusieurs études [1][2] et les résultats ont mis en évidence ses performances thermiques, hydriques et acoustiques particulièrement intéressantes. A l'échelle de la paroi, les recherches sont menées pour étudier plusieurs phénomènes physiques comme l'hystérésis dans le béton de chanvre [3][4][5]. La dépendance des isothermes de sorption à la température a été abordée par Tran Le [6], Ouméziane [7], Rode [8], Dubois [9] et Colinart et Glouannec [10]. Ces derniers ont étudié l'influence de la thermodépendance des isothermes de sorption sur la prédiction des

évolutions dynamiques de la température et de l'humidité relative au sein des parois en béton de chanvre. Cependant, si la littérature regorge de recherches sur cet aspect à l'échelle de la paroi, rares sont les études abordées à l'échelle du local, surtout celles qui traitent des impacts des transferts hygrothermiques sur les conditions de température et d'humidité de l'air intérieur et des consommations énergétiques associées.

Par conséquent, le travail vise à étudier la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre ainsi que les effets engendrés sur le confort hygrothermique et les consommations énergétiques d'un local destiné à usage bureautique. L'outil de simulation numérique SPARK est utilisé à cet égard. Deux modes de ventilation sont testés selon qu'ils sont autoréglable ou hygroréglable.

2. Aperçu scientifique

L'étude de l'effet de la température sur le comportement hydrique d'un matériau poreux de construction est récente. Les travaux menés par Poyet et Charles [11] et Brue [12] ont montré que la température modifie l'allure de l'isotherme de sorption. Trois grandes théories peuvent expliquer les principaux phénomènes à l'origine de cette modification :

- 1) La modification de la structure des pores: un élargissement de la taille des pores est attribué à une augmentation de la température.
- 2) Les changements des propriétés intrinsèques de l'eau avec la température ce qui pourrait expliquer le comportement hydrique du matériau à saturation.
- 3) L'évolution thermodynamique des mécanismes de sorption avec la température : étant donné que l'adsorption est un processus exothermique [13], une augmentation de la température entrave son processus physique en provoquant une diminution du nombre de molécules adsorbées et donc de la teneur en eau.

Parmi les approches qui traitent l'influence de la variation de la température sur le comportement des matériaux poreux, on cite celle de Poyet et Charles basée sur l'évolution de l'équilibre thermodynamique de l'adsorption et de la désorption. Dans leurs travaux, ils introduisent la notion de chaleur isostérique de sorption q_{st} ($J.kg^{-1}$) qui peut être calculée à partir de deux isothermes de sorption à deux températures différentes. Connaissant cette énergie isostérique, la prédiction de l'évolution d'une isotherme de sorption à une température donnée sera faite en se basant sur la relation de Clausius-Clapeyron [11]:

$$\varphi_2(\theta, T_2) = \varphi_1(\theta, T_1) \frac{P_{sat}(T_1)}{P_{sat}(T_2)} e^{q_{st}(\theta) \frac{M_1}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)} \quad (1)$$

Avec M_1 la masse molaire de l'eau ($kg.mol^{-1}$), et R la constante des gaz parfaits ($J.mol^{-1}.K^{-1}$). Le calcul de la chaleur isostérique de sorption est basé sur les travaux d'Ouméziane et al. [7]

3. Modélisation numérique

3.1. Modèle de transferts de chaleur et d'humidité

L'outil de simulation numérique SPARK (Simulation Problem Analysis Research Kernel) est utilisé. Un aperçu sur ce logiciel est présenté par Moussa et al. [14]. La modélisation du comportement hygrothermique dans les matériaux poreux nécessite la connaissance des phénomènes de transport d'humidité et de chaleur. Philip et De Vries [15], Pedersen [16], Kunzel [17], et Mendes et al.[18] ont proposé des modèles physiques traitant cet aspect. Ces

modèles se distinguent par le choix des variables d'état (humidité relative, teneur en eau ...) et des hypothèses de transport adaptées (transport sous gradient de pression de vapeur ou de température, capillarité ...). Dans cette étude, le modèle de Mendes qui tient compte des transports d'humidité sous les phases liquide et vapeur est utilisé. Ce modèle est détaillé dans les travaux de Moussa et al. [14]. Dans la littérature, de nombreuses approches de modélisation des isothermes de sorption sont utilisées, à savoir celles de GAB et BET. Cependant, des études récentes [10] ont montré leur incapacité à reproduire les évolutions dynamiques des résultats expérimentaux en tenant compte de la variation des courbes de sorption en fonction de la température. De ce fait, deux autres approches pour modéliser les isothermes de sorption sont étudiées pour tester la sensibilité de la modélisation aux équations de ces isothermes. La première, celle de Merakeb [19], bien adaptée pour les matériaux celluloseux et applicable pour le béton de chanvre s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\theta}{\theta_{\max}} = a \ln(\varphi) e^{(b\varphi)} \quad (2)$$

La deuxième, celle de Rode [20], à manipulation facile et implémentation rapide est donnée par :

$$\frac{\theta}{\theta_{\max}} = \left(1 - \frac{\ln \varphi}{A}\right)^{-1/n} \quad (3)$$

A noter que le modèle de Merakeb est bien adapté pour les humidités relatives élevées et celui de Rode pour les humidités relatives intermédiaires (Figure 1). Les coefficients θ_{\max} , a , et b sont tout d'abord calculés par la méthode des moindres carrés sur la courbe d'adsorption. En fixant θ_{\max} et b , la courbe de désorption est déterminée. θ_{\max} est alors fixée à $0,081 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Avec cette valeur, les coefficients a et b sont de nouveau calés sur la courbe moyenne de sorption. Une démarche pareille est appliquée pour le calage des coefficients θ_{\max} , A , et n dans le cas du modèle de Rode. La Figure 1 présente les courbes moyennes de sorption des deux modèles en comparaison avec les données expérimentales de Lelievre et al. à 23°C [3].

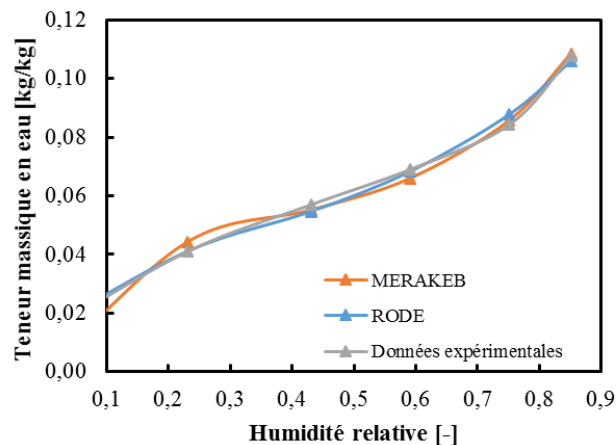


Figure 1 : Calage des modèles sur la courbe de sorption moyenne [3]

La thermodépendance des isothermes de sorption est étudiée comme suit : en passant par l'équation (3), de nouvelles équations des courbes de sorption sont dérivées à plusieurs températures (10°C , 15°C et 30°C). Des lois de variations des coefficients des courbes de sorption et de la capacité hydrique pourraient être ainsi déduites en fonction de la température pour couvrir toute plage de variation de cette dernière. Le modèle numérique à

thermodépendance fait donc appel à ces coefficients variables dans l'implémentation sous SPARK et non pas explicitement à l'équation (3) de Clausius-Clapeyron.

3.1. Validation numérique à l'échelle de la paroi

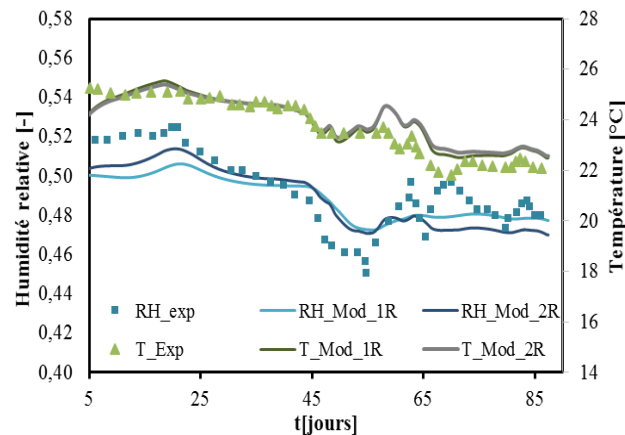


Figure 2 : Validation numérique des modèles de Rode à l'échelle de la paroi [3]

Quatre modèles numériques sont testés sous SPARK. Mod_1R et Mod_1M sont des modèles standards utilisant la courbe moyenne de sorption avec des coefficients constants basés sur les approches de Rode et Merakeb respectivement. Mod_2R et Mod_2M, tiennent compte de la thermodépendance des isothermes et utilisent la courbe moyenne de sorption avec des coefficients variables en fonction de la température. La validation des modèles Mod_1M et Mod_2M est détaillée dans les travaux de Costantine et al. [21]. Mod_1R et Mod_2R sont validés comme le montre la Figure 2. D'après Lelievre et al. [3], l'essai concerne une paroi simple de 36 cm en béton de chanvre soumise à des conditions particulières de température et d'humidité relative sur ses faces intérieure et extérieure. La densité et la capacité thermique du béton de chanvre sont $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ respectivement. Sa conductivité thermique est donnée en fonction de la température (K) et de la teneur massique en eau par ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) [3]:

$$\lambda = 0,00818 + 0,000276T + 0,0024w \quad (4)$$

Les températures et les humidités relatives sont mesurées à trois endroits différents de la paroi et sont présentées uniquement à une distance $x = 5 \text{ cm}$ de sa surface intérieure dans la Figure 2. Etant donné que les précisions des capteurs sont de l'ordre de 1°C pour la température et de 2% pour l'humidité relative, les écarts obtenus avec les données expérimentales (qui ne dépassent pas $1,5^\circ\text{C}$ et 3%) sont acceptables. Les modèles, validés ainsi à l'échelle de la paroi, sont utilisés dans la suite de l'étude à l'échelle du local.

3.2. Etude numérique à l'échelle d'un local

Un bureau virtuel ($6\times 4\times 3 \text{ m}^3$) est considéré. La façade Sud comporte une couche de 36 cm de béton de chanvre avec une surface vitrée. Les mêmes propriétés du béton de chanvre à l'échelle de la paroi sont introduites. Le bureau est occupé par deux personnes du lundi au samedi entre 8h - 13h et 14h - 18h. La température est réglée à 20°C de Novembre à Avril pendant les périodes d'occupation et à 17°C ailleurs. Pour les mois restants, elle fluctue entre 17°C et 28°C . Les besoins de chauffage et de climatisation sont calculés par un contrôleur proportionnel-intégrateur PI. Deux stratégies de ventilation sont considérées : l'autoréglable avec un débit d'air constant ($36 \text{ m}^3/\text{h}$) et l'hygroréglable avec un débit sensible à l'humidité relative intérieure et qui varie entre 16 et $43 \text{ m}^3/\text{h}$. Les simulations sont effectuées pour une

année complète pour les conditions météorologiques de la ville de Nancy. Le pas de temps est fixé à 720 s. Le transfert de chaleur net à l'intérieur du local tient compte des flux thermiques à travers l'enveloppe (radiations courtes et grandes longueur d'onde...), du renouvellement de l'air d'infiltration, des déperditions dues aux ponts thermiques, et des charges thermiques additionnelles provenant d'autres sources. L'équation-bilan de l'énergie de l'air s'écrit alors :

$$\left(\rho_i C_p V + I\right) \frac{dT}{dt} = \phi_{Ouest} - \phi_{Est} + \phi_{Sud} - \phi_{Nord} + \phi_{Plancher} - \phi_{Toiture} + \phi_{Source} \quad (5)$$

I étant l'inertie thermique du local, et ϕ_i les flux thermiques de conduction à travers les murs de partition, ou de l'extérieur, ou des sources latentes de chaleur existantes. Les conditions d'humidité dans le bureau sont liées aux échanges à travers les surfaces intérieures et le renouvellement d'air, et au taux de génération d'humidité par les occupants et les éventuelles sources de production. Ceci se traduit par l'équation de conservation de la masse suivante :

$$V \frac{d\rho_i}{dt} = Qm_{Ouest} - Qm_{Est} + Qm_{Sud} - Qm_{Nord} + Qm_{Plancher} - Qm_{Toiture} + Qm_{Source} \quad (6)$$

Qm étant le débit massique transféré entre l'air intérieur et les alentours. Seule la façade Sud du local est exposée aux conditions climatiques du climat de Nancy. Les autres façades sont considérées comme des partitions intérieures avec d'autres espaces contrôlés à 20°C de température et 60% d'humidité relative. La diffusion d'humidité à travers le plancher est négligée. Les transferts massiques à travers les surfaces intérieures des autres murs sont pris en considération avec des coefficients d'échange réduits pour souligner l'impact du béton de chanvre sur les conditions intérieures.

4. Résultats et discussion

4.1. Ventilation autoréglable

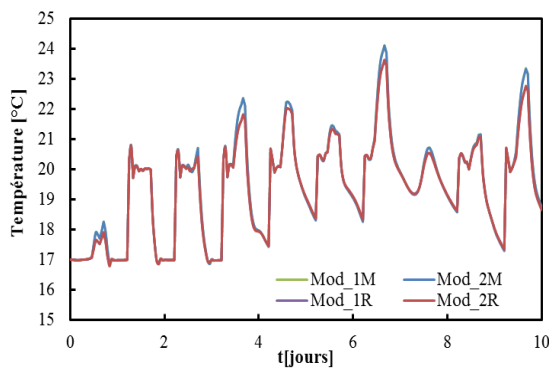


Figure 3 : Température de l'air intérieur pendant 10 jours en hiver

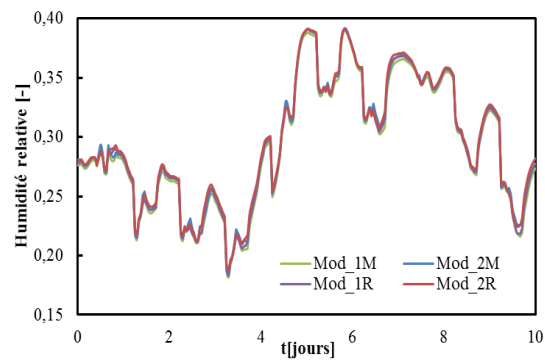


Figure 4 : Humidité relative de l'air intérieur pendant 10 jours en hiver

Deux périodes de 10 jours chacune sont sélectionnées et présentées dans les Figure 2 jusqu'à Figure 6. La première période hivernale s'étend entre fin février et début mars et la période estivale est prise courant septembre. Les courbes de température sont presque confondues entre le modèle standard et le modèle avec variation de température que ce soit en hiver ou en été dû au fait qu'elle est contrôlée par le PI. Les humidités relatives de l'air intérieur sont aussi très proches. Pendant l'hiver, l'humidité relative intérieure varie entre 17% et 40% tandis que sa marge de variation pendant l'été est plus élevée (26%-50%). Ceci est dû au fait que l'air est soufflé de l'extérieur à une teneur en eau supérieure à cause de l'élévation de la température en été.

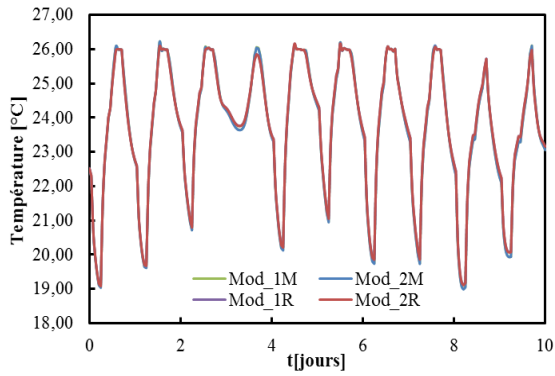


Figure 5 : Température de l'air intérieur pendant 10 jours en été

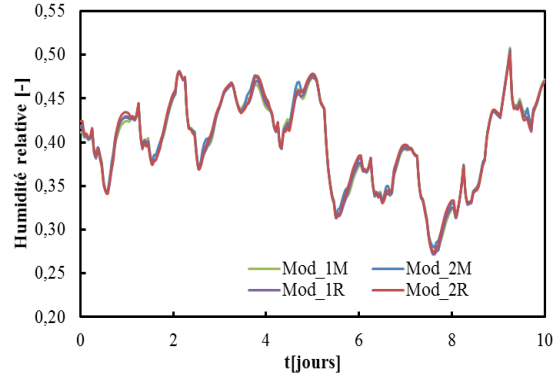


Figure 6 : Humidité relative de l'air intérieur pendant 10 jours en été

Ensuite, selon Rode et Merakeb, le modèle avec dépendance de température montre des humidités relatives supérieures surtout durant l'été. Ceci s'explique par les températures élevées auxquelles est exposée la paroi pendant l'été, ce qui entraîne un déplacement de la courbe de sorption vers le bas, et en d'autres termes une diminution de la teneur en eau dans la paroi. Le béton de chanvre devenant plus sec, l'humidité relative de l'air intérieur augmente. Cette observation est prouvée en traçant l'évolution de la teneur volumique en eau au milieu de la paroi en fonction de l'humidité relative comme le montrent les Figure 7 et Figure 8. Lorsque la température devient supérieure à 23°C (température de référence des isothermes), la courbe de sorption descend au-dessous de celle de la courbe moyenne signalant une diminution de la teneur en eau dans la paroi. D'ailleurs, une légère augmentation de température (0,5°C à 1°C) est affichée par le modèle de Merakeb surtout pendant le jour. En effet, pour la marge d'humidité relative obtenue, la courbe moyenne de sorption du modèle de Merakeb est supérieure à celle de Rode. De ce fait, l'adsorption est favorisée, et comme étant exothermique, une augmentation de température est décelée dans ce cas. Ainsi, l'humidité relative de l'air intérieur a une tendance globale à être inférieure dans le modèle de Merakeb.

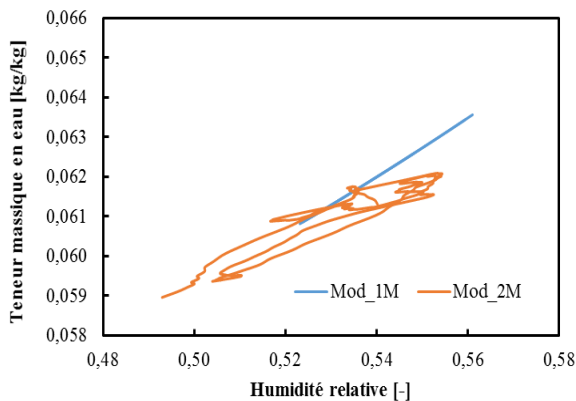


Figure 7 : Evolution de la teneur en eau au milieu de la paroi (Merakeb)

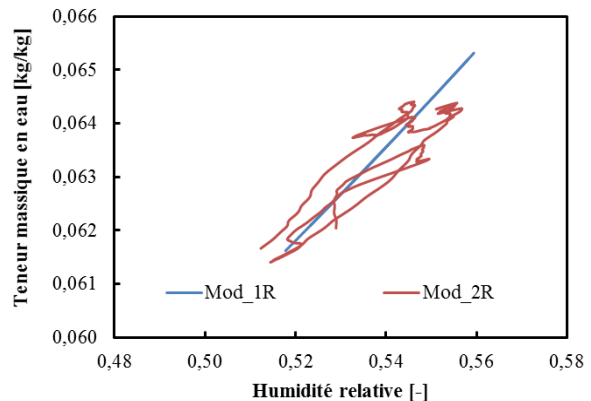


Figure 8 : Evolution de la teneur en eau au milieu de la paroi (Rode)

En termes de consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation, les résultats sont regroupés dans le Tableau 1. Les besoins en chauffage et rafraîchissement suivent la même tendance entre le modèle standard et le modèle de thermodépendance des isothermes selon les deux approches. L'énergie apportée pour le chauffage est plus grande en tenant

compte de la variation de la température. Par contre, le besoin requis pour le refroidissement est inférieur pour le même cas. Raisonner sur les consommations énergétiques fait appel à la notion de l'inertie de l'enveloppe. Celle-ci se détermine suivant trois facteurs essentiels :

	<i>Chauffage [kWh]</i>	<i>Climatisation [kWh]</i>
Mod_1M	884,11	136,03
Mod_2M	887,12	134,01
Mod_1R	884,49	135,76
Mod_2R	891,18	133,42

Tableau 1 : *Charges de chauffage et de climatisation annuelles pour un débit autoréglable*

la surface d'échange des parois, la chaleur spécifique des matériaux, et leur conductivité thermique. Les deux premiers paramètres étant invariables dans cette étude, ainsi que les conductivités thermiques des parois en partition, une interprétation basée sur la variation de la conductivité thermique de l'enveloppe en béton de chanvre est appliquée. En fait, pendant l'été, et avec la thermodépendance des isothermes, les températures augmentent causant des diminutions dans la teneur en eau, ce qui fait augmenter la conductivité thermique du béton de chanvre. Ainsi, le flux de chaleur est conduit de l'intérieur vers l'extérieur, réduisant ainsi le besoin de refroidissement. En hiver, les humidités relatives de l'air intérieur étant supérieures avec le cas de la thermodépendance, la paroi est ainsi en train de désorber plus d'humidité. La désorption étant endothermique, les besoins de chauffage augmentent alors dans ce cas. Un faible écart existe entre les besoins de chauffage et de climatisation entre Merakeb et Rode. En fait, l'adsorption est favorisée dans le cas de Merakeb due à sa courbe de sorption supérieure. Le caractère exothermique de l'adsorption fait augmenter légèrement les besoins de climatisation en été et réduit de la même manière le chauffage en hiver.

3.3. Cas de ventilation hygroréglable

Des observations pareilles ont été trouvées avec le cas de ventilation hygroréglable pour les températures et les humidités relatives de l'air intérieur. Cependant, comme le montre le Tableau 2, les besoins de chauffage diminuent énormément dans ce cas avec une légère augmentation des charges de refroidissement. En effet, en hiver, l'humidité relative intérieure étant inférieure à celle de l'extérieur, la nécessité de ventiler diminue ainsi que les demandes de chauffage. Par ailleurs, pendant l'été, l'augmentation d'humidité relative intérieure favorise le besoin d'air refroidi en comparaison avec le cas autoréglable.

	<i>Chauffage [kWh]</i>	<i>Climatisation [kWh]</i>
Mod_1M	600,28	151,40
Mod_2M	601,55	150,10
Mod_1R	600,85	150,93
Mod_2R	608,82	148,22

Tableau 2 : *Charges de chauffage et de climatisations annuelles pour une ventilation hygroréglable*

Les tendances générales de chauffage et climatisation sont semblables au cas autoréglable. En hiver, avec le modèle de thermodépendance, les humidités relatives intérieures étant supérieures que le modèle standard, le débit de ventilation requis augmente, ainsi que les charges de chauffage (601,55 et 608,82 kWh). En été, comme expliqué précédemment, l'augmentation de la conductivité thermique à travers la paroi avec le modèle de variation des isothermes avec la température contribue à l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur, ce qui fait baisser les charges de refroidissement (150,10 et 148,22 kWh). Les écarts entre les

besoins de rafraîchissement des deux approches sont dus au caractère exothermique de l'adsorption favorisée avec l'approche de Merakeb.

4. Conclusion

Une étude de l'influence de la thermodépendance des isothermes de sorption du béton de chanvre a été abordée à l'échelle d'un local. Deux approches différentes pour la modélisation des isothermes (Merakeb et Rode) sont testées pour deux stratégies de ventilation : l'autoréglable et l'hygroréglable. Les investigations montrent une cohérence des résultats entre les modèles standards de transferts et les modèles qui tiennent compte de la variation des isothermes de sorption en fonction de la température du point de vue température et humidité relative de l'air intérieur. De faibles écarts sont détectés pour les besoins de chauffage (augmentation de 0,5%) et de climatisation (diminution de 1%) en considérant la thermodépendance des isothermes. Un modèle standard de transferts pourrait être alors bien prometteur à l'échelle d'un local. Les résultats mettent l'accent aussi sur la faible sensibilité de la modélisation de la courbe moyenne de sorption sur les résultats.

5. Références bibliographiques

- [1] F. Collet, "Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux," Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2004.
- [2] A. Evrard, "Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials," Polytechnical School of Louvain, 2008.
- [3] D. Lelievre, T. Colinart, and P. Glouannec, "Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses," *Energy Build.*, vol. 84, pp. 617–627, Dec. 2014.
- [4] Y. Ait Ouméziane, "Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre," INSA de Rennes, 2013.
- [5] G. Costantine, G.; Maalouf, C.; Kinab, E.; Polidori, "Etude numérique du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre," in *IBPSA France*, 2016.
- [6] A. D. T. Le, D. Samri, M. Rahim, O. Douzane, G. Promis, and T. Langlet, "Effect of Temperature-dependent Sorption Characteristics on The Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1449–1454, Nov. 2015.
- [7] Y. Aït Oumeziane, S. Moissette, M. Bart, and C. Lanos, "Influence of temperature on sorption process in hemp concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 600–607, 2016.
- [8] C. Rode and C. O. Clorius, "Modeling of Moisture Transport in Wood with Hysteresis and Temperature-Dependent Sorption Characteristics," in *ASHREA*, 2004.
- [9] D. Samuel, E. Arnaud, B. Christophe, and L. Frédéric, "Temperature and moisture storage in crop-based materials: Modelling a straw bale wall subject to a thermal shock," *J. Build. Phys.*, vol. 39, no. 5, pp. 421–439, Mar. 2016.
- [10] T. Colinart and P. Glouannec, "Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling," *Energy Build.*, vol. 139, pp. 360–370, 2017.
- [11] S. Poyet and S. Charles, "Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials: Heat of sorption and Clausius–Clapeyron formula," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 1060–1067, 2009.
- [12] F. Brue, "Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydrromécanique des bétons," Ecole Centrale de Lille, France, 2009.
- [13] S. Brunauer, L. S. Deming, W. E. Deming, and E. Teller, "On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 62, no. 7, pp. 1723–1732, Jul. 1940.
- [14] T. Moussa, C. Maalouf, M. Lachi, S. Umurigirwa, T. H. Mai, and J.-F. Henry, "Development and performance evaluation of a hemp-starch composite," *J. Build. Phys.*, vol. 40, no. 3, pp. 278–295, Nov. 2016.
- [15] J. R. Philip and D. A. De Vries, "Moisture movement in porous materials under temperature gradients," *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, no. 2, p. 222, 1957.
- [16] C. R. Pedersen, "Transient calculation on moisture migration using a simplified description of hysteresis in the sorption isotherms," *Proc. 2nd Symp. Build. Phys. Nord. Ctries.*, no. Technical University of Norway, Trondheim, Norway., 1990.
- [17] M. Künzle Hartwig, "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and two dimensional calculation using simple parameters," Stuttgart, 1995.
- [18] N. Mendes, F. Winkelmann, R. Lamberts, and P. Philippi, "Moisture effects on conduction loads," *Energy Build.*, vol. 35, no. 7, pp. 631–644, Aug. 2003.
- [19] S. Merakeb, F. Dubois, and C. Petit, "Modeling of the sorption hysteresis for wood," *Wood Sci. Technol.*, vol. 43, no. 7–8, pp. 575–589, Apr. 2009.
- [20] C. Rode, "Hysteresis and Temperature Dependency of Moisture Sorption – New Measurements," *Proc. 9th Nord. Symp. Build. Phys.*, 2011.
- [21] G. Costantine, G.; Maalouf, C.; Kinab, E.; Polidori, "Numerical study of a hemp concrete wall," in *Advanced Buildings Skins ABS*, 2016.