

Etude numérique et expérimentale du comportement hygrothermique d'un agro-composite à base de fibres de chanvre et d'amidon de blé.

Benitha Sandrine Umurigirwa*, Chadi Maalouf, Ali Halouani, Ton Hoang Mai

GRESPI/Thermomécanique EA4694

BP 1039 Moulin de la Housse 51687 Reims cedex 2,

*benitha-sandrine.umurigirwa@univ-reims.fr

RESUME. A l'issue du Grenelle de l'environnement, atteindre 10% de matériaux bio-ressourcés dans le secteur du bâtiment hors bois d'œuvre, fait partie des objectifs fixés d'ici 2020. Parmi ces matériaux bio-ressourcés, les bétons de chanvre occupent une place importante pour leurs propriétés intéressantes: régulation hydrique, isolation thermique et acoustique etc. Dans ce contexte, nos travaux s'intéressent aux propriétés hydriques d'un béton de chanvre-amidon et surtout à son inertie hydrique. Des mesures expérimentales sont effectuées afin de déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau (méthode de la coupelle), l'isotherme de sorption ainsi que la capacité tampon hydrique du matériau (méthode Nordtest). Ces études sont complétées par des études numériques à l'échelle d'un local avec le programme orienté objet SPARK afin de mieux caractériser le comportement dynamique du matériau.

MOTS-CLÉS : chanvre-amidon, comportement hygrothermique et simulation.

ABSTRACT. Our paper focuses on experimental and numerical studies of hydric properties of a bio-based composite made with hemp fibres and wheat starch as a binder. Experimental measurements are based on the measurement of water vapour permeability (cup method), moisture buffer value and the sorption isotherm curve. The results underline the high moisture transfer and storage capacities of hemp-starch concrete and classify the composite as an excellent hydric regulator. Experimental results are complemented by numerical study with the simulation program SPARK to better characterize the hygrothermal performance of hemp starch material on building level.

KEYWORDS: Hemp-starch, hygrothermal behavior and simulation.

1. INTRODUCTION

Pour assurer le confort dans un bâtiment, l'humidité relative de l'air avoisinant est un facteur important. L'utilisation d'un matériau régulateur d'humidité est un moyen efficace pour stabiliser l'humidité ambiante sans consommer de l'énergie et assurer ainsi un niveau de confort satisfaisant. Les matériaux de construction qui absorbent et libèrent l'humidité peuvent être utilisés pour réduire de manière positive les écarts extrêmes entre les niveaux d'humidité au sein de la paroi. Les bétons de chanvre en général font partie de ces matériaux et ils sont réputés pour leurs performances hygrothermiques.

Le béton de chanvre est fabriqué à base d'un liant qui peut être d'origine minérale tel que la chaux ou le ciment ou végétale tel que l'amidon. Ce matériau de construction est utilisé pour concevoir des panneaux ou bien des parois par moulage de blocs, coulage ou pulvérisation (Shea et al. 2012). Plusieurs travaux effectués sur le béton de chanvre-chaux montrent que ce matériau a des

performances intéressantes du point de vue isolation thermique, acoustique et se présente comme un excellent régulateur d'humidité. Ces performances sont liées à sa porosité très élevée et essentiellement « ouverte »(Evrard et De Herde 2005).

Le béton de chanvre est un matériau fortement hygroscopique avec une faible conductivité thermique. Utiliser un enveloppe en béton de chanvre dans le bâtiment est un excellent moyen d'amortir les variations quotidiennes de température et l'humidité de l'air intérieure (Samri 2008). Ce matériau permet ainsi de réduire la demande énergétique et contribue à améliorer le confort au sein de l'habitat. En revanche, l'utilisation d'une matrice minérale contribue à l'épuisement des ressources naturelles par le processus d'extraction des matières premières. Dans le cadre du développement durable, concevoir un matériau 100% végétal tel que le béton de chanvre-amidon paraît intéressant pour l'avenir.

Dans cet article, les auteurs présentent les propriétés hygrothermiques de ce matériau (la perméabilité à la vapeur d'eau, la valeur de la capacité tampon hydrique et l'isotherme de sorption). Ensuite, La simulation numérique avec l'environnement SPARK est utilisée pour comparer le comportement de ce matériau à celui du chanvre chaux et du béton normal.

2. MATERIAUX

Le chanvre est une plante qui pousse dans les climats tempérés sans engrais ni traitements. Un granulats végétal appelé « chènevotte » est extraite à partir de la tige de chanvre (Aube, France). La chènevotte utilisée dans ce travail s'appelle «KANABAT» et provient de la chanvrière de l'Aube. Elle se présente sous forme de fibres dont la taille varie de 5 à 20 mm.

Afin d'améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice polymère à base d'amidon de blé, les fibres ont subi un traitement de surface à base de NaOH et ensuite traitées avec un agent de couplage silane pour améliorer la matrice (Umurigirwa et al. 2013).

L'amidon de blé utilisé provient de la société Chamtor (Pomacle, France). Il a été conservé dans une chambre climatisée à 23°C et 50 % d'humidité relative. Il est dissout dans de l'eau chauffée et forme un liant par un processus irréversible de gélatinisation provoqué par le gonflement des granules. Le liant rapproche les fibres entre elles et stabilise la structure composite afin d'assurer la transmission des forces de cisaillement dans le composite. La formulation utilisée est donnée dans la référence (Umurigirwa et al. 2012).

3. ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. PERMÉABILITÉ A LA VAPEUR D'EAU

La perméabilité d'un matériau définit sa capacité à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'une pression entre ses deux faces opposées. La perméabilité à la vapeur d'eau désigne donc le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression de vapeur régnant de part et d'autre du matériau. Pour caractériser ce paramètre, une méthode normalisée dite « méthode de la coupelle » est présentée sous la norme NF EN ISO standard 12571 (AFNOR 2000). Elle consiste à imposer un gradient de pression de vapeur constant et unidimensionnelle en condition isotherme à un échantillon d'épaisseur e .

Deux tests sont utilisés : la méthode de la coupelle sèche (0/50%) et la méthode de la coupelle humide (50/94%). Pour la méthode sèche, le chlorure de calcium anhydre CaCl_2 a été utilisé pour créer une ambiance à 0% d'humidité relative dans les coupelles alors qu'une solution aqueuse saturée de nitrate de potassium KNO_3 a été utilisée pour la méthode humide. Dans les deux cas, cinq échantillons sont placés dans une enceinte climatique Binder MKF720 à 23°C et 50% d'humidité relative tout au long de l'essai (figure 1). En respectant la norme, une correction tenant compte de l'effet de bord a aussi été effectuée.

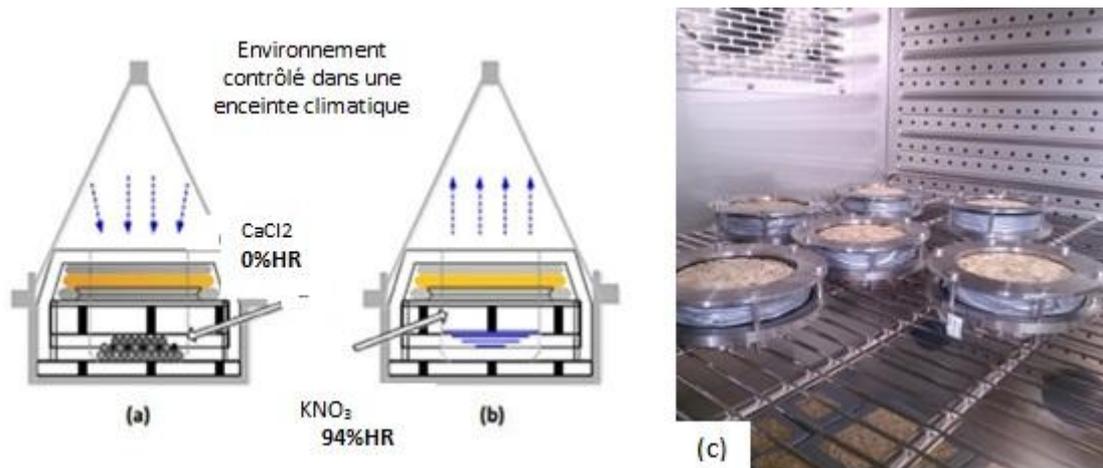


Figure 1 : Dispositif expérimental : (a) coupelle sèche (b) coupelle humide (c) photographie des échantillons dans l'enceinte climatique.

Le tableau 1 montre les résultats pour les deux tests. Pour la coupelle humide, une humidité relative élevée entraîne l'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (δ) et induit un transport d'humidité par condensation capillaire. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) diminue de 5,94 à 4,36 pour le béton de chanvre-amidon lorsque l'humidité relative augmente. Ce dernier est défini par :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (1)$$

δ_a étant la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air.

	$\delta(\text{kg/m.sec.Pa})$	$\mu (-)$
Coupelle sèche	3,39E-11	5,94
Coupelle humide	4,64E-11	4,36

Tableau 2: Résultats de la coupelle humide.

Comparé au chanvre-chaux, le chanvre-amidon présente une perméabilité à la vapeur d'eau élevée environ de 3,39E-11 kg / m.sec.Pa à faible humidité relative (résultat de la coupelle sèche) et de 4,64E-11 kg / m.sec.Pa pour une humidité relative élevée (résultats de la coupelle humide). Les formulations de bétons de chanvre-chaux étudiés par (Collet et al. 2013) présentent une perméabilité à la vapeur d'eau δ inférieure et constante de 3,2E -11 kg / m.sec.Pa et 2,5E -11 kg / m.sec.Pa respectivement pour une humidité relative faible et moyenne.

3.2. CAPACITÉ TAMPON HYDRIQUE

L'inertie hygrique est évaluée en fonction de la capacité tampon hydrique MBV du matériau. Issue d'un terme anglais « moisture buffer value », la capacité tampon hydrique permet de caractériser la capacité d'un matériau ou d'un composant multicouche, à modérer les variations de l'humidité relative de l'air avoisinant. Cette valeur indique la quantité d'eau adsorbée ou rejetée lorsque le matériau est soumis à une variation de 1% d'humidité relative.

Pour mesurer la capacité tampon hydrique, 4 échantillons de 5 cm d'épaisseur et diamètre 9,3 cm sont utilisés (figure 2 (a)) selon la procédure indiquée dans le Nordtest (Rode 2005). Les échantillons ont été placés dans une ambiance à 23°C et 50% d'humidité relative jusqu'à stabilisation de leur masse, ensuite ils ont été soumis à variation périodique journalière d'humidité relative (8h à 75% et 16h à 33%). La masse des échantillons a été mesurée 5 fois pendant la phase d'adsorption et 2 fois pendant la désorption. Le test est arrêté lorsque la variation de masse en adsorption sur 3 jours consécutifs est inférieure à 5%. La figure 2 (b) montre la variation de masse d'un échantillon pendant l'essai.

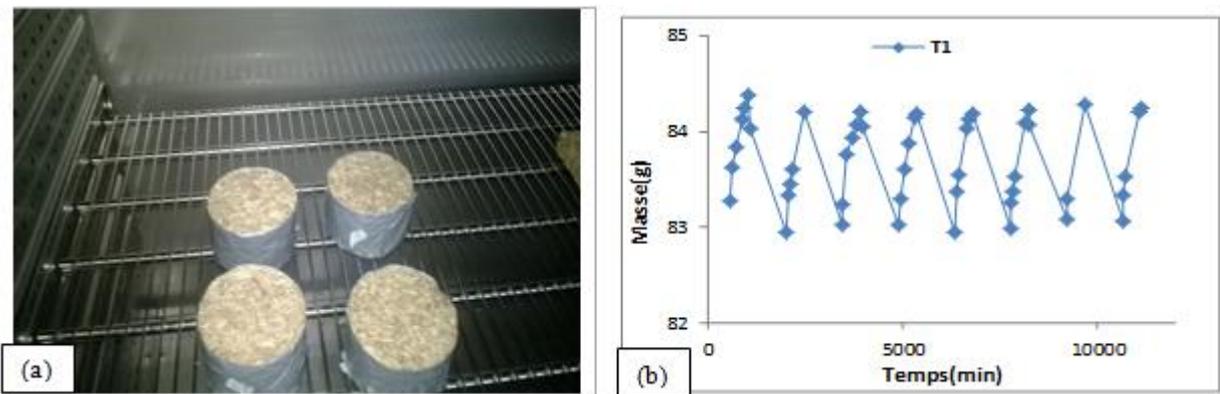


Figure 2 : (a) photographie des échantillons pour la mesure de MBV (b) cinétique de sorption d'un échantillon.

La capacité tampon hydrique est calculée pendant la dernière journée selon la relation :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot (HR_{haute} - HR_{faible})} \quad (2)$$

D'après les résultats obtenus, le béton de chanvre amidon présente un coefficient tampon hydrique égale à 4,25 g/m².% HR et classé comme étant « un excellent régulateur d'humidité » selon la classification de (Rode 2005). Par rapport aux résultats expérimentaux de la littérature, le béton de chanvre-chaux présente une valeur de capacité tampon hydrique de 2,15 g /m².% HR pour des épaisseurs allant de 7 à 8 cm (Collet et Pretot 2012, Collet et al. 2013) et une valeur de 1,39 g/m².% HR pour une épaisseur de 1,75 cm pour la composition testée par (Evrard 2006). L'effet de revêtement sur la valeur de la capacité tampon hydrique a été évalué par (Collet et al. 2012). Celui-ci réduit la valeur de MBV en général de 2,15 g/m². % HR à 1,87 g/m². % HR après l'application d'un mortier à base de chaux. La capacité de tampon hydrique est élevée pour le chanvre amidon car l'amidon utilisé a une grande capacité d'absorption d'humidité.

3.3. ISOTHERME DE SORPTION

Un matériau présentant une porosité dite « ouverte » tel que le béton de chanvre, a la capacité d'échanger de l'humidité relative avec l'air ambiant. Lorsque l'humidité relative de l'air augmente à la surface du matériau elle entraîne une augmentation de la masse apparente et cette prise de masse est due au phénomène d'adsorption physique qui permet de fixer les molécules d'eau à la surface des pores d'une façon réversible. De même, une diminution d'humidité de l'air environnant entraîne une perte de masse apparente et c'est le phénomène de désorption. L'adsorption se décompose en trois phases : adsorption monomoléculaire, adsorption polymoléculaire et la condensation capillaire. Ces trois phases permettant de décrire le comportement du matériau à l'échelle microscopique proposé par (Collet 2004).

La mesure de l'isotherme de sorption a été effectuée selon la norme NF EN ISO standard 12572 (AFNOR 2001). Les échantillons ont été séchés dans un dessiccateur contenant du chlorure de calcium anhydre et ensuite sont placés dans une enceinte climatique pour des humidités relatives de 33%, 50%, 70% et 94% en adsorption et 84%, 75%, 50% et 33% en désorption. Cinq échantillons ont été utilisés. La teneur en eau w est définie par :

$$w = \frac{m - m_0}{m_0} = \frac{m_w}{m_0} \quad (3)$$

Avec m_0 la masse de l'échantillon à l'état sec.

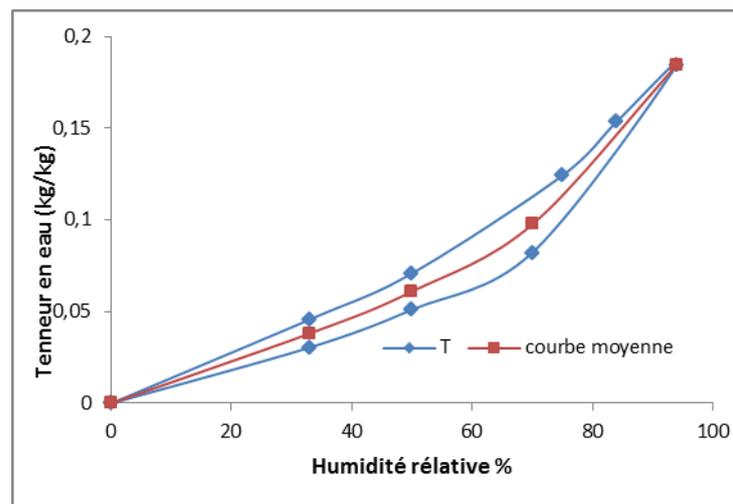


Figure 3 : Isotherme d'adsorption et de désorption du béton de chanvre amidon à 23°C ainsi que la courbe moyenne utilisé pour la simulation.

La figure 3 montre les courbes d'adsorption et de désorption mesurées. On remarque un phénomène d'hystérésis entre l'adsorption et la désorption qui est lié à l'effet de la « bouteille d'encre » (Daïan, 1986) se produisant dans les pores ainsi qu'à la différence de mouillabilité des pores en adsorption et désorption évoqué par (Léon y Léon 1998). Le taux réel d'humidité se situe toujours entre les deux courbes et une courbe moyenne a été utilisée pour la simulation numérique.

4. SIMULATION NUMERIQUE

4.1. MODÈLES MATHÉMATIQUES

Dans la littérature on trouve plusieurs modèles permettant de modéliser les transferts hygrothermiques dans une paroi. Ces modèles diffèrent par leur approche et leur complexité. Ils sont surtout basés sur la théorie de (Philippe et De vries 1957). Pour notre étude, on a utilisé le modèle Umidus (Mendes 1987) qui considère que l'humidité traverse le matériau poreux sous forme liquide et gazeuse. La phase liquide est supposée se déplacer par capillarité tandis que la phase gazeuse se diffuse en fonction des gradients de pression partielle de vapeur d'eau. Avec ces considérations, l'équation du bilan d'humidité exprimée en fonction de la teneur en eau volumique θ devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Avec comme conditions aux limites (en $x=0$) :

$$-\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = h_{M,e} (\rho_{ve,a} - \rho_{ve,s}) \quad (5)$$

L'équation du bilan d'énergie 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 :

$$\rho_0 C_{p_m} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (6)$$

$$C_{p_m} = C_{p_0} + C_{p_l} \frac{\rho_l}{\rho_0} \theta \quad (7)$$

Où C_{p_m} est la chaleur spécifique moyenne tenant compte de la chaleur spécifique du matériau sec et de la contribution de la chaleur spécifique dans la phase liquide. Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,e} - L_v \rho_l \left(D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,e} = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) + \Phi_{ray,e} \quad (8)$$

Les coefficients de convection thermique et massique sont reliés par la relation de Lewis. Pour la face intérieure de la paroi, c'est les mêmes conditions aux limites qui s'appliquent.

4.1.1. Détermination des coefficients de transports

Les coefficients de transport sont calculés en utilisant les formulations proposées par (Philip et De Vries 1957 et Kunzel 95). Pour la diffusivité hydrique, elle est déduite de la connaissance de la perméabilité apparente à la vapeur et l'inverse des pentes des tangentes aux isothermes d'adsorption-désorption ξ selon la formule 9. δ_a étant la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air tandis que μ est le facteur de la résistance à la vapeur d'eau.

$$D_\theta = \frac{\delta_a}{\mu} \frac{P_{vs} \mathbf{1}}{\rho_o \xi} \quad (9)$$

L'équation de la diffusivité de la vapeur sous gradient de température est donnée par la relation :

$$D_\theta = \varphi \frac{\delta_a}{\rho_1 \mu} \frac{dP_{vs}}{dT} \quad (10)$$

Pour simplifier le problème, la diffusivité de la vapeur $D_{\theta,ve}$ sous gradient de teneur en eau est prise égale à la diffusivité hydrique D_{θ} . La thermomigration de la phase liquide $D_{T,ve}$ est négligée et de ce fait le coefficient de thermomigration D_T est pris égal à celui-ci.

4.1.2. Le modèle de l'ambiance

Pour modéliser le transfert hygrothermique dans l'ambiance, nous utilisons la méthode nodale. La méthode nodale se compose des équations de conservation de l'énergie et de masse dans l'ambiance, des équations de transfert hygrothermique dans les parois, des formules additionnelles de convection entre les surfaces intérieures de paroi avec les couches limites adjacentes et finalement des équations des échanges radiatifs entre les surfaces et son environnement (Tran Le 2010).

Afin de résoudre le système obtenu, les équations ont été implémentées dans l'environnement de simulation SPARK, un environnement orienté objet permettant de résoudre de façon efficace les systèmes d'équations différentielles (Sowell et Haves 2011). La méthode des différences finies a été utilisée (schéma implicite). Les modèles implémentés ont été validés dans le cadre de l'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie (Annex 41 2003).

4.2. SIMULATION

4.2.1. Présentation du cas étudié

Dans cette partie, nous présentons le comportement d'un local de 15 m^2 et de volume de $42,75 \text{ m}^3$ lorsqu'il est ventilé par de l'air à une humidité relative faible (saut statique d'humidité relative de l'air de ventilation de 60% à 25%) dans des conditions isothermes de 20°C . Initialement le local est en équilibre avec l'air intérieur à 60% d'humidité relative. Aucune source de vapeur ou de chaleur n'est considérée dans le local. Le plancher est supposé imperméable à l'humidité. Les parois ont 20 cm d'épaisseur et sont en contact avec de l'air à 20°C . Elles sont monocouches. Trois matériaux ont été comparés : le chanvre-amidon, le béton de chanvre chaux et le béton normal. Les propriétés physiques des bétons de chanvre-amidon et chanvre chaux ont été présentées dans les paragraphes précédents. Pour le béton normal, les données de WUFI sont utilisées.

4.2.2. Résultats de simulation

La figure 4(a) montre la variation de l'humidité relative du local en fonction du taux de renouvellement d'air pour des parois en chanvre-amidon. L'humidité relative intérieure est amortie pour des faibles taux de renouvellement d'air. En fait, les parois vont aussi échanger de l'humidité avec le local. Ce taux d'humidité échangé contribue à l'amortissement de la chute de l'humidité relative pour les faibles renouvellements d'air. Lorsque le débit de renouvellement d'air augmente, la teneur en eau de l'air extérieur sec l'emporte sur la quantité d'eau dégagée des parois et l'humidité relative diminue plus rapidement.

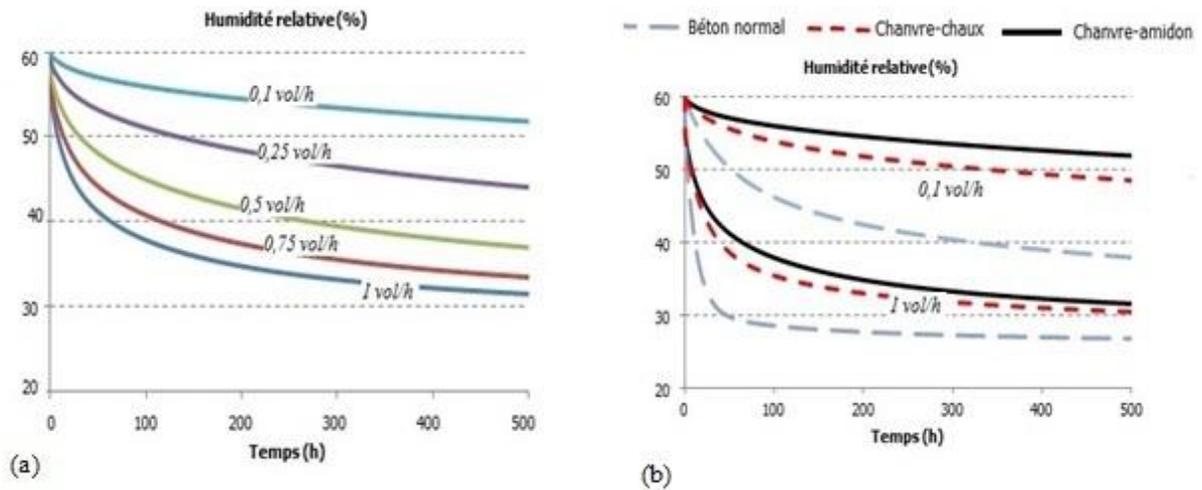


Figure 4 : (a) Variation de l'humidité relative dans le local en chanvre-amidon en fonction du taux de renouvellement d'air (b) comparaison de l'humidité relative pour des locaux en chanvre-amidon, chanvre-chaux et béton normal et pour deux débits de 0,1 vol/h et 1 vol/h

La figure 4(b) compare le comportement du chanvre-amidon à celui du chanvre-chaux et du béton normal pour deux taux de renouvellement d'air : 0,1 et 1 vol/h. On remarque que le chanvre-amidon amortit mieux que le chanvre-chaux et le béton normal, ce qui est cohérent avec les mesures de la capacité tampon hydrique présentée dans la partie expérimentale.

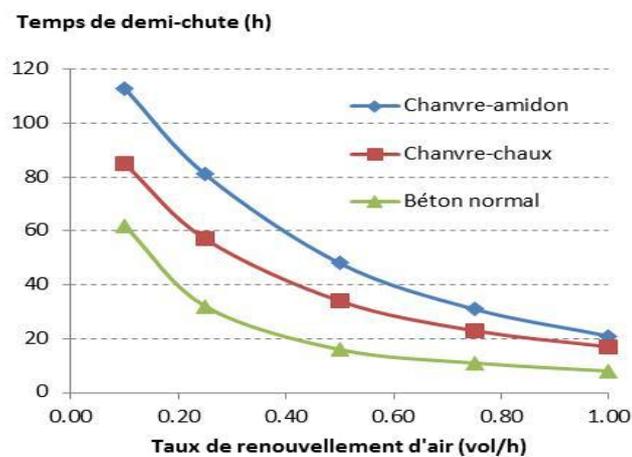


Figure 5 : Comparaison du temps de demi-chute de l'humidité relative pour le chanvre-amidon, le chanvre chaux et le béton normal en fonction du taux de renouvellement d'air dans le local.

La figure 5 montre le temps (h) nécessaire pour que l'humidité relative diminue de moitié en fonction du taux de renouvellement d'air et pour les trois matériaux étudiés. Ce temps désigné par temps de demi-chute est plus élevé pour le chanvre-amidon que pour les autres matériaux. Il décroît de 113 à 21 heures lorsque le renouvellement augmente de 0,1 à 1 renouvellement par heure pour le chanvre-amidon, de 85 à 17 heures pour le chanvre-chaux et de 62 à 8 pour le béton normal. Ces résultats montrent une excellente capacité d'amortissement de l'humidité par les bétons de chanvre par rapport au béton normal.

5. CONCLUSION

Dans cet article, on a mesuré les propriétés hydriques d'un agro-matériau en chanvre-amidon, ce qui nous a permis d'effectuer des simulations à l'échelle d'un local et de comparer le comportement hydrique de ce matériau en régime dynamique à celui du chanvre-chaux et du béton normal. Nous avons présenté un modèle unidimensionnel de transfert hygrothermique dans une paroi simple couche et utilisé la méthode nodale pour modéliser l'ambiance intérieure d'un local. Les simulations ont été effectuées avec l'environnement SPARK qui est adapté aux problèmes complexes. Les résultats ont montré que le chanvre-amidon a une excellente capacité tampon hydrique qui lui permet de mieux amortir les variations de l'humidité relative par rapport au chanvre-chaux et béton normal. Plus le taux de renouvellement d'air est faible, plus la capacité de régulation hygrothermique est importante.

6. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2000. « Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapor transmission properties ». *NF EN ISO standard 12571:2000*.
- AFNOR. 2001. « Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties ». *NF EN ISO standard 12572:2001*.
- Annex 41. 2003. «Whole bidding heat air. Moisture response». <http://www.kuleuven.ac.be/bwf/projects/projected/overview.php>
- Collet, Florence. 2004. « Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2004.
- Collet, Florence et Sylvie Pretot. 2012. « Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete ». *Construction and building materials* 36 (58-65).
- Collet, Florence, Sylvie Prétot et Christophe Lanos. 2012. « Effect of rendering on moisture buffer value of hemp concrete ». *UK-European workshop on renewable construction materials research and practice*, Rhyl, Northwales.
- Collet, Florence, Julien Chamoin, Sylvie Prétot et Christophe Lanos. 2013. « Comparison of the hygric behavior of three hemp concretes ». *Energy and building* 62 (2013) 294-303.
- Daïan, J. F. 1986. « Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux. Etude expérimentale du mortier de ciment ». Thèse de doctorat, Université de Grenoble : USTMG/INPG, p 329.
- Evrard, Arnaud et De Herde André . 2005. « Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete » In *CISBAT 2005*, 25-30, Lausanne, Suisse.
- Evrard, Arnaud. 2006. « Sorption behavior of lime-hemp concrete and its relation to indoor comfort and energy demand ». *23rd Conference on passive and low energy architecture*, Geneva.
- Kunzel, M. 1995. « Simultaneous heat and moisture transport in building components ». http://www.wufi.de/index_e.html (section: Literature).
- Léon y León, Carlos A. 1998. « New perspectives in mercury porosimetry ». *Advances in Colloid and Interface science*, vol 76-77, p 341-342.
- Mendes, Nathan . 1997. « Models for prediction of heat and moisture transfer through porous building element ». Thèse de doctorat, Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, SC, Brésil.
- Philip, J.R. et De Vries D.A. 1957. « Moisture movement in porous materials under temperature gradients ». *Transaction of American Geophysical Union*, Vol.38, n°2, p.222-232.

- Rode, Carstern. 2005. « *Moisture Buffering of Building Materials* » DTU Report, civil engineering department, Technical university of Denmark.
- Samri, Driss. 2008. « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique ». Thèse de doctorat, Université de Lyon/ENTPE, p 284.
- Shea, Andy, Mike Lawrence et Pete Walker. 2012. « Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building » *Construction and building materials* 36 (270-275) 2012.
- Sowell, Edward F et Philip Haves. 2001. « Efficient solution strategies for building energy system simulation ». *Energy and Buildings*, vol. 33, p. 309-317.
- Tran le, Anh Dung, Chadi Maalouf, Katia Cordeiro Mendonca, Ton Hoang Mai, Etienne Wurtz. 2009. « Study of moisture transfer in doubled-layered wall with imperfect thermal and hydraulic contact resistances ». *Journal of Building Performance Simulation*, 2, 251–266.
- Tran Le, Anh Dung, Chadi Maalouf, Ton Hoang Mai, Etienne Wurtz et Florence Collet. 2010. « Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building, envelope ». *Energy and Buildings*, vol. 42, p. 1797-1806.
- Umurigirwa, Benitha Sandrine, Lan Tiguezert, Philippe Dony, Ton Hoang Mai et Maalouf Chadi. 2013 « Influence of chemical treatments on the properties of green composites based on hemp fibers and starch ». *6th international wood fibre polymer composites symposium*. September 23-24, Biarritz.
- Umurigirwa, Benitha Sandrine, Alexandre Gacoin, Alex Li, Chadi Maalouf, Ton Hoang Mai et Mourad Rebay. 2012. « Etude expérimentale du béton de chanvre à base d'amidon ». XXX^{èmes} Rencontres AUGC/IBPSA 2012. 6-8 Juin, Chambéry.