
Étude des performances hygrothermiques d'un agrocomposite pour le bâtiment

**Tala Moussa, Chadi Maalouf, Benitha Sandrine Umurigirwa,
Ton Huang Mai**

*GRESPI, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Université de Reims Champagne-Ardenne
Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex, France
tala.moussa@univ-reims.fr*

RÉSUMÉ. À 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. Le béton de chanvre fait partie de ces agro-matériaux. À base de chènevotte et de liants minéraux tels que la chaux ou de polymère comme l'amidon, les composites de chanvre sont appréciés pour leurs propriétés hygrothermiques et acoustiques. Dans cette étude, un liant végétal à base d'amidon extrait du blé est utilisé avec de la chènevotte traitée et non traitée pour former un composite plutôt écologique. Le chanvre-amidon est préparé avec un ratio ($H/S = 3,3$). Les propriétés hygrothermiques telles que la capacité tampon hydrique, l'isotherme de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau, la conductivité thermique et la capacité calorifique sont expérimentalement mesurées. La distribution de la taille des pores est effectuée par la porosimétrie à mercure. Les résultats révèlent que le composite chanvre-amidon pourra être une solution prometteuse dans le domaine de l'isolation en raison de sa faible conductivité thermique et sa capacité à réguler l'humidité intérieure.

ABSTRACT. Following the environment grenelle, reaching 10% of bio-resourced materials in building sector except wood is one of goals until 2020. Among these agro-materials, one can distinguish the hemp concrete. Based on hemp hurds and mineral binders including lime or polymer as starch, the hemp composites are appreciated for their hydrothermal and acoustic properties. In this study, a vegetal binder based on starch and extracted from wheat is used with treated and non-treated hemp hurds to form an ecological composite. The studied hemp-starch is prepared with a ratio ($H/S = 3,3$). Hygrothermal properties such as moisture buffering value, sorption isotherm, water vapor permeability, thermal conductivity, and heat capacity are experimentally studied. The pore size distribution is performed using mercury porosimetry. Results reveal that the hemp-starch composite may be a promising solution in the insulation field due to its relatively low thermal conductivity and capacity to regulate the indoor relative humidity.

MOTS-CLÉS : chanvre, amidon, sorption, humidité, porosité.

KEYWORDS: hemp, starch, sorption, humidity, porosity.

DOI:10.3166/RCMA.26.277-294 © Lavoisier 2016

Extended abstract

The building sector is one of most energy and resources consuming: buildings consume about 40% of world global energy, 25% of global water and 40% of global resources (United Nation Environment Program, 2016). Thus, several European countries tend to adopt regulations in order to contribute to a better energy savings and maintain a sustainable development. In that context, the shift from classical building materials to an environmentally friendly materials, as for instance, the hygroscopic materials including hemp-starch can be a good solution to reduce the energy needs and ensure the indoor comfort.

Hemp, a multifunctional plant, grows up in different European countries as Portugal and France and find its usage in different industries including textiles and feed production. However, new researches tend to valorize this crop in building sector as insulation layers. Mixed with wheat starch as a binder instead of cement or lime, hemp shives lead to a 100% vegetal composite which can be applied on building envelopes by casting or pre-fabricated blocks. Compared to other composites, hemp-starch shows a low thermal conductivity and a high compressive strength which can be explained by the higher interaction between the binder and the hemp fibres. Thus, the hemp-starch composite has interesting thermal and hygric properties (cf Guessasma *et al.*, 2015; Le *et al.*, 2015; Umurigirwa *et al.*, 2015) without being classified as load bearing materials (Nguyen *et al.*, 2009).

In this contribution, authors present an agromaterial based on hemp shives and wheat starch. Different samples are shown: with non-treated or treated shives using a sodium hydroxide solution. Hygrothermal properties are experimentally measured. Sorption isotherms are determined at 15 and 23°C using a climatic chamber which ensures the desired relative humidity levels from 20% till 97%. Experimental data are modelled according to GAB, Van Genuchten and Merakeb (2008) which are based on a thermodynamic approach and suitable for cellulosic materials. The recorded moisture buffering values (MBV) are higher than 2 according to Rode (2005) classification, and then it confirms the excellent buffering behaviour of the aforementioned agrocomposite. The treated composite presents a higher MBV than the non-treated one due to the affinity of the treatment to water molecules. The water vapour permeability, heat conductivity, and capacity are also reported and ensure the thermal insulation capacity of the hemp-starch. In addition, the pore structure characterization is conducted using the mercury porosimetry technique. Pore diameter analysis shows that the pores are mainly macropores with 95,55% of the intrusive volume. In addition, the average pore diameter is about 0,75 µm which corresponds to a macropore diameter. Therefore, it is advisable to know that this hygroscopic behavior of the studied agrocomposite is due to the open porosity structure which promotes the moisture exchange with the outside.

1. Introduction

Récemment, l'utilisation des ressources naturelles dans le bâtiment constitue de plus en plus un enjeu majeur dans la perspective du développement durable. La demande en matériaux bioressourcés s'accroît dans les pays européens dans le but d'améliorer la performance de l'enveloppe tout en réduisant la consommation énergétique et en respectant la réglementation thermique d'ici 2020.

Parmi ces agromatériaux, le béton de chanvre est apprécié pour ses propriétés thermohydriques telles que la régulation de l'humidité, l'isolation thermique et acoustique (cf. Collet et Pretot, 2012 ; Cerolini *et al.*, 2009). L'utilisation d'un matériau régulateur d'humidité est un moyen efficace pour stabiliser l'humidité ambiante sans consommer d'énergie et assurer ainsi un niveau de confort satisfaisant. Ces agromatériaux absorbent et libèrent l'humidité et peuvent être utilisés pour réduire de manière positive les écarts extrêmes entre les niveaux d'humidité au sein de la paroi. Ces performances sont liées essentiellement à la structure poreuse « ouverte » qui favorise l'échange d'humidité avec l'extérieur (Evrard et De Herde, 2005). Néanmoins, les propriétés mécaniques du béton de chanvre restent limitées par rapport à d'autres matériaux utilisés en génie civil (Shea *et al.*, 2012). Par conséquent, il ne pourra pas être utilisé comme élément porteur de la structure, mais il convient de l'associer avec d'autres structures porteuses telles que le bois. Dans la littérature, les travaux sur le béton de chanvre se concentrent plus sur la formulation classique constituée d'un liant minéral à base de chaux (Simonson *et al.*, 2004 ; Collet et Pretot, 2014). En revanche, l'utilisation d'une matrice minérale contribue à l'épuisement des ressources naturelles par le processus d'extraction des matières premières.

Cette étude concerne l'élaboration d'un agromatériau à base de chanvre (chènevotte) et d'un liant végétal (amidon du blé). La composition du matériau brut et traité est présentée suivie d'une caractérisation thermo-hydrrique expérimentale (capacité tampon hydrique, isothermes de sorption, perméabilité à la vapeur, chaleur spécifique et distribution porale par un porosimètre à mercure).

2. Matériaux et traitement de la chènevotte

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle de hauteur variant entre 1 et 3 m. Le chanvre pousse dans les régions à climat tempéré (France, Italie...) et résiste bien aux maladies et aux parasites. En France, la surface cultivée en chanvre est d'environ 10 000 ha en 2015. Cultivée par la « Chanvrière de l'Aube » et fournie par « le bâtiment associé » en France, la chènevotte « kanabat » extraite de la partie bois de la plante est utilisée dans la formulation du chanvre-amidon en tant que granulats végétaux. Elle se présente sous forme de fibres dont la taille varie de 5 à 20 mm. La chènevotte est conservée dans une chambre climatisée à 23 °C et 50 % d'humidité relative.

L'amidon de blé est fourni par l'entreprise Chamtor basée à Bazancourt. Afin d'améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice polymère à base d'amidon de

blé, les fibres subissent un traitement de surface à base de NaOH (1 %) suivi d'un agent de couplage silane (Umurigirwa *et al.*, 2013). D'autres traitements plus respectueux pour l'environnement peuvent être appliqués, à savoir l'huile de lin.

Le traitement avec l'hydroxyde de sodium (mercerisation) appliqué aux fibres vise à enlever la partie amorphe à la surface des fibres et, par conséquent, diminue le diamètre de la fibre et permet d'augmenter le taux de cristallinité ainsi que la rigidité des fibres. La partie amorphe enlevée contient de la lignine, l'hémicellulose et la pectine. Les fibres sont trempées pendant 72 heures dans la solution à 1 % puis rincées pour la première fois avec une solution à 1 % de concentration volumique à base d'acide acétique CH_3COOH afin de neutraliser l'excès d'hydroxyde de sodium. Les fibres sont ensuite rincées à plusieurs reprises, de 4 à 5 fois, dans l'eau désionisée jusqu'à ce que le pH du surnageant soit proche de celui de l'eau désionisée. Par la suite, ce traitement améliore le module élastique et diminue la déformation à la rupture. D'autres méthodes de traitement peuvent être appliquées telles que l'imprégnation par des agents hydrophobes : résines époxy, polyester, des produits bitumineux, de l'huile de lin ou de noix de cajou, ou encore des stéarates de calcium ou de l'acide stéarique (Gram, 1988). Ces méthodes d'imprégnation permettent, dans certains cas, de ralentir ou de retarder la fragilisation des fibres.

Les échantillons traités de cette étude sont préparés avec un ratio massique chanvre/amidon de 3,3 ce qui correspond à la quantité de liant optimale pour que toutes les fibres soient complètement enrobées (Umurigirwa, 2014). Ils sont compactés sous une pression de 0,25 MPa à l'aide d'une presse. La masse volumique finale est de 220 kg.m^{-3} . Les échantillons sont présentés dans la figure 1. Comparé au béton de chanvre classique (à base de chaux) dont la masse volumique varie entre 258 et 463 kg.m^{-3} (Collet, 2014) ce composite s'avère plus léger.

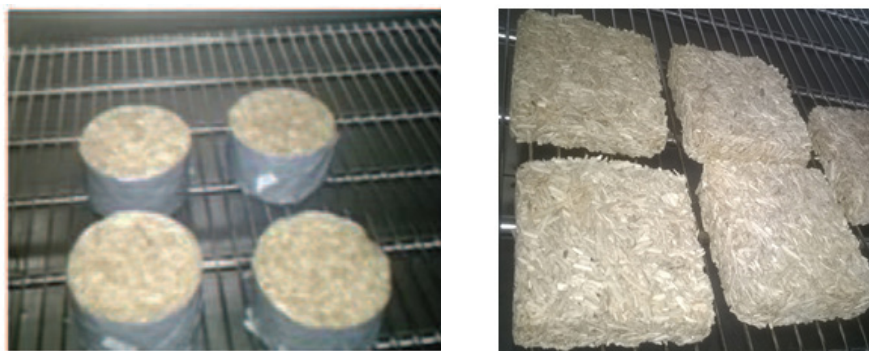


Figure 1. Échantillons de chanvre-amidon

3. Résultats et discussions

3.1. Isothermes 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 condensation capillaire. Ces trois phases permettent de décrire le comportement du matériau à l'échelle microscopique (Collet et Pretot, 2012).

Les essais de sorption sont effectués en respectant la norme NF EN ISO Standard 12572 (AFNOR, 2001a) sur des échantillons de dimensions 100 x 100 x 25 mm³. Ils permettent de tracer la courbe de sorption représentant pour une température donnée, la variation de la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant (*cf.* équation 1).

$$w = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (1)$$

avec m_0 la masse de l'échantillon à l'état sec. Le point de départ de la courbe de sorption correspond à la masse sèche des échantillons. Ils sont placés à l'intérieur d'un dessiccateur contenant du chlorure de calcium anhydre créant 0 % d'humidité relative, puis l'ensemble est placé dans une enceinte climatique Binder MKF 720 maintenue à 23°C, jusqu'à ce que l'équilibre hygroscopique soit atteint. L'échantillon est considéré en équilibre une fois que la masse de l'échantillon présente une variation inférieure à 1 % de la masse totale, sur trois pesées successives, effectuées à 24 heures d'intervalle. Après chaque pesée des échantillons, nous avons réalisé le vide d'air à l'intérieur du dessiccateur à l'aide d'une trompe à eau puis le dessiccateur est remplacé dans l'enceinte climatique. Le chlorure de calcium est régénéré à 250 °C avant son utilisation et pendant deux heures.

Après avoir trouvé le point initial de la courbe, les échantillons traités et non traités sont ensuite placés à des humidités relatives de 20 %, 33 %, 53 %, 75 %, 84 %, 94 % et 97 % en adsorption et en désorption.

3.1.1. Courbes expérimentales

La figure 2a montre la courbe d'adsorption pour les échantillons traités (T) et non traités (NT). Il s'avère que le traitement de la chènevotte n'a pas d'impact sur la teneur en eau du matériau sauf pour les humidités relatives élevées où la chènevotte traitée semble retenir plus d'eau. Ceci est dû au traitement silane qui est hydrophile.

Les isothermes obtenues pour les deux compositions présentent une sigmoïde de type 2 selon la théorie de Brunauer, Emmett et Teller (BET), typique pour les matériaux cellulosiques (Park, 1986 ; Alix *et al.*, 2009 ; Celino *et al.*, 2014) et de type II d'après la classification IUPAC (Sing *et al.*, 1985).

La relation entre la teneur en eau et l'humidité relative est une fonction non linéaire. Pour les humidités relatives faibles et moyennes, la teneur en eau augmente légèrement. À titre de comparaison, à 53 % d'humidité relative, la teneur en eau est de 5,7 % pour le chanvre-amidon traité et 5,8 % pour le chanvre-amidon brut. Pour les humidités relatives élevées, nous constatons une forte augmentation de la teneur en eau : jusqu'à 19 % pour le chanvre-amidon traité à 94 % d'humidité relative contre 17,6 % pour le chanvre-amidon brut.

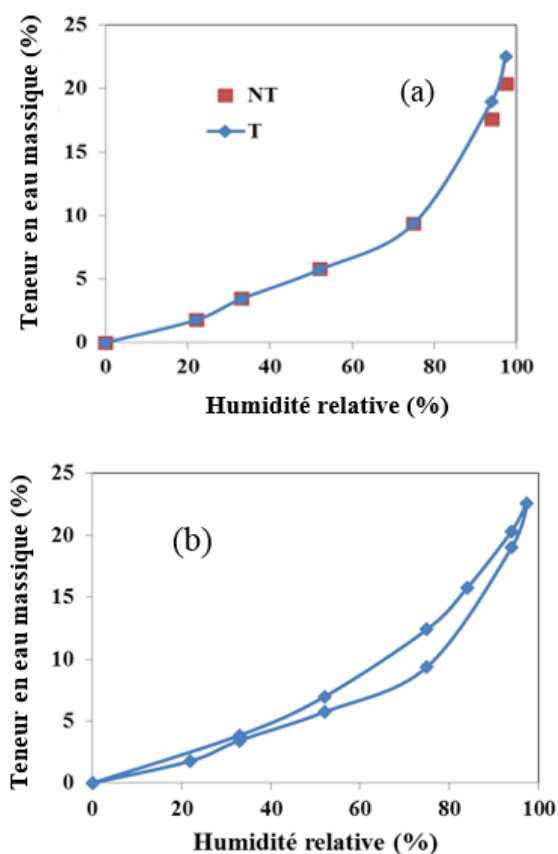


Figure 2. Isotherme d'adsorption et de désorption du béton de chanvre-amidon à 23°C : 2a) courbes d'adsorption pour les échantillons traités et non traités, 2b) courbes d'adsorption et de désorption pour les échantillons traités

La figure 2b montre la courbe d'adsorption et de désorption pour le chanvre-amidon traité. On remarque l'existence d'un phénomène d'hystérésis dont la valeur à une humidité relative donnée représente la différence entre la teneur en eau de la courbe de désorption et celle de la courbe d'adsorption. Ce phénomène est lié à l'effet de la « bouteille d'encre » selon Daian (1986) se produisant dans les pores ainsi qu'à la différence de mouillabilité des pores en adsorption et désorption (Leon y Leon, 1998). Ce phénomène est moins important pour la chènevotte brute dont la courbe de désorption n'a pas été présentée.

La figure 3 montre la courbe d'adsorption en fonction de la température pour les échantillons traités (T) et non traités (NT). Pour les deux cas, lorsque la température augmente de 15 °C à 23 °C, la teneur en eau dans le matériau diminue. L'augmentation de la température entraîne l'augmentation de la pression de la vapeur dans le matériau, ce qui favorise le transfert de l'eau du matériau vers l'ambiance.

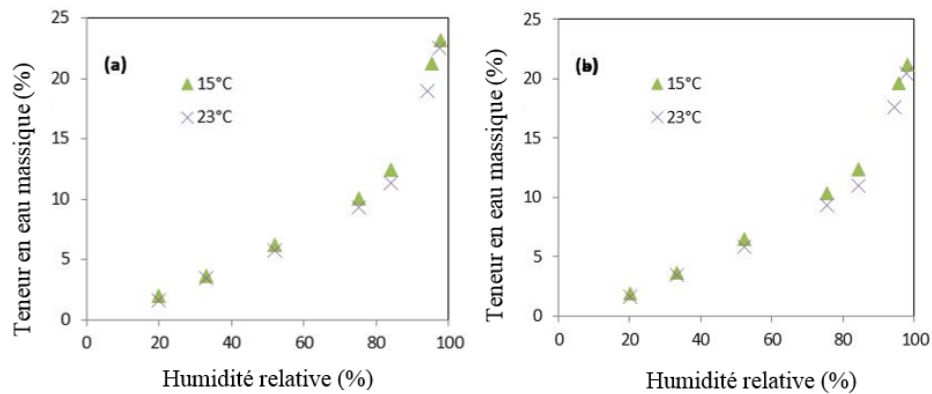


Figure 3. Isotherme d'adsorption du béton de chanvre-amidon à 15°C et à 23°C :
3a) courbes d'adsorption pour les échantillons traités, 3b) courbes d'adsorption pour les échantillons non traités

3.1.2. Modélisation des données expérimentales

Trois modèles sont utilisés pour modéliser les isothermes de sorption : le modèle GAB, le modèle de Van Genuchten et celui de Merakeb (Merakeb *et al.*, 2008). Ce dernier a été choisi car il est basé sur une approche thermodynamique et semble adapté aux matériaux cellulosiques. Les équations de ces modèles et leurs paramètres sont donnés dans le tableau 1. Les données expérimentales sont ajustées aux modèles en utilisant la méthode des moindres carrés. Le coefficient de détermination, R^2 , est calculé pour donner une mesure de la proportion de la variabilité attribuée au modèle. En plus de R^2 , deux autres critères sont utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement de chaque modèle, l'écart relatif moyen E et l'erreur quadratique moyenne RMSE dont les formules sont données par :

$$E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|m_e^i - m_p^i|}{m_e^i} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_e^i - m_p^i)^2}{N}} \quad (3)$$

où m_e est la valeur expérimentale, m_p est la valeur estimée par le modèle et N le nombre total des valeurs expérimentales. Une valeur de l'écart relatif moyen ne dépassant pas 10 % indique un bon ajustement entre les valeurs expérimentales et analytiques. D'ailleurs, plus les valeurs de E et $RMSE$ sont faibles, meilleure est la qualité de l'ajustement.

Tableau 1. Modèles mathématiques utilisés pour les isothermes de sorption

Modèle	Equation	Paramètres
Merakeb	$\ln\left(\frac{u}{u_s}\right) = a \ln(\phi) \exp(b\phi)$	a, b, u_s
GAB	$u = \frac{M_0 C K \phi}{(1 - K\phi)[1 - K\phi + C K \phi]}$	C, K, M_0
Van Genuchten (VG)	$u = u_s \left(1 - \alpha_{ads} \frac{RT}{M_l g} \ln \phi\right)^{\eta_{ads}} - \left(1 - \frac{1}{\eta_{ads}}\right)$	$u_s, \alpha_{ads}, \eta_{ads}$

Pour le modèle de GAB, M_0 désigne la teneur en eau moléculaire, c'est-à-dire la teneur en eau nécessaire pour recouvrir d'une couche de molécules d'eau la surface de l'adsorbat. C et K sont fonction de la chaleur molaire latente de vaporisation et de la chaleur molaire d'adsorption. Or, u_s est la teneur en eau massique de saturation.

Les tableaux 2 et 3 montrent les valeurs des paramètres des différents modèles utilisés pour des températures de 15 et 23 °C. Les modèles de GAB et de Merakeb sont plus à même de prédire la teneur en eau dans le composite chanvre-amidon puisque leur écart relatif moyen reste inférieur à 10 % à 15 et à 23 °C. Les valeurs expérimentales ainsi que les valeurs lissées du modèle GAB et celui de Merakeb sont tracées dans la figure 4 pour 15 et 23 °C.

Pour le modèle GAB, la teneur en eau de la couche monomoléculaire varie de 3,8 à 4,09 % et de 4,3 à 4,84 % lorsque la température varie de 23 à 15 °C pour les échantillons traités et non traités respectivement. La valeur du paramètre C est supérieure à 2 pour tous les cas confirmant que la forme de la courbe est de forme sigmoïde (Bajpai *et al.*, 2011)

Tableau 2. Valeurs des paramètres pour l'isotherme de sorption pour les T et NT à 23 °C

Échantillons			
Modèle	Paramètres	Traité (T)	Non Traité (NT)
Merakeb	a	1,155	1,144
	b	1,436	1,275
	u_s	0,253	0,224
	R^2	0,9979	0,9977
	E (%)	8,160	7,737
	RMSE	0,357	0,337
GAB	C	3,136	3,183
	K	0,855	0,822
	M_0	0,038	0,043
	R^2	0,998	0,998
	E (%)	8,960	6,557
	RMSE	0,519	0,272
Van Genuchten (VG)	α_{ads}	0,0008	0,0006
	η_{ads}	1,750	1,770
	u_s	0,234	0,207
	R^2	0,995	0,994
	E (%)	11,962	11,905
	RMSE	0,523	0,540

Tableau 3. Valeurs des paramètres pour l'isotherme de sorption pour les T et NT à 15 °C

Échantillons			
Modèle	Paramètres	Traité (T)	Non Traité (NT)
Merakeb	a	1,71	1,085
	b	1,504	1,247
	u_s	0,256	0,225
	R^2	0,995	0,994
	E (%)	6,891	6,805
	RMSE	0,495	0,484
GAB	C	4,412	3,479
	K	0,850	0,802

	M_0	0,0409	0,0484
	R^2	0,996	0,995
	E (%)	5,376	5,772
	RMSE	0,457	0,443
Van Genuchten (VG)	α_{ads}	0,0008	0,0006
	η_{ads}	1,734	1,754
	u_s	0,237	0,210
	R^2	0,995	0,992
	E (%)	9,828	11,460
	RMSE	0,522	0,6002

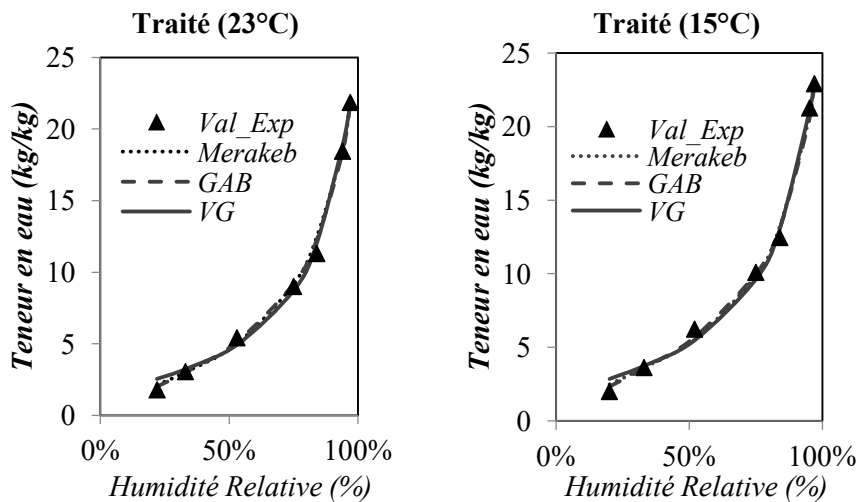


Figure 4. Isothermes de sorption pour le composite chanvre-amidon traité à 15 et 23 °C

3.2. Capacité tampon hydrique

La capacité hydrique tampon (*Moisture Buffer Value MBV*) est mesurée en suivant le protocole du projet NORDTEST reporté par Rode (2005). Elle est déterminée par la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par une unité de surface et s'exprime en $g (m^2 \%RH^{-1})$. Avant d'effectuer les mesures, les échantillons ($100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$) sont placés dans l'enceinte climatique maintenue à 23 °C et 50 % d'humidité relative jusqu'à la stabilisation de leur masse. Ils sont ensuite soumis à des cycles dynamiques, de période de 24 heures, pendant lesquels

l'humidité relative est réglée à 75 % pendant 8 heures et à 33 % les 16 heures suivantes.

Les échantillons sont pesés 5 fois pendant la phase d'adsorption à 75 % d'humidité relative et 2 fois pendant la phase de désorption correspondant à 33 % d'humidité relative. Le test est arrêté lorsque la variation de l'écart de masse entre la phase d'adsorption et de désorption est inférieure à 5 %, sur 3 jours consécutifs. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4. Les valeurs sont dispersées entre 3,36 – 3,45 g m⁻² %RH⁻¹ avec une moyenne de 3,39 g m⁻² %RH⁻¹. Pour des échantillons non traités, les mesures montrent une valeur moyenne de 2,58 g m⁻² %RH⁻¹, soit une valeur inférieure à celle du chanvre-amidon traité. Par conséquent, selon la classification de Rode (2005) le chanvre-amidon est un excellent régulateur d'humidité (MBV > 2). Ces résultats montrent également que le traitement des fibres effectué améliore la capacité du matériau à fixer ou rejeter l'humidité relative. L'utilisation de l'amidon comme liant augmente la capacité tampon hydrique du matériau par rapport à celle de la chaux (MBV du béton de chanvre varie entre 1,94 et 2,15 g m⁻² %RH⁻¹) (Collet, 2013)

Tableau 4. Capacité tampon hydrique des échantillons traités (T)

Échantillons	1	2	3	4
MBV (g m ⁻² %RH ⁻¹)	3,36	3,36	3,41	3,45
Ecart type (g m ⁻² %RH ⁻¹)	0,05	0,05	0,02	0,03

3.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau est effectuée selon la norme NF EN ISO 12572 (AFNOR, 2001b) par la méthode de la coupelle sèche et celle de la coupelle humide présentées en figure 5. Le principe d'essai consiste à imposer à un échantillon d'épaisseur e un gradient de pression de vapeur constant et unidimensionnel dans les conditions isothermes. Avant l'essai, les éprouvettes de diamètre 100 mm et d'épaisseur 25 mm sont stockées à 23 °C et 50 % d'humidité relative pour que leur masse se stabilise, jusqu'à ce que trois déterminations quotidiennes et successives ne varient plus de 5 %. Après la stabilisation du poids, la surface latérale est recouverte par un papier adhésif et étanche pour assurer un transfert monodimensionnel. Un suivi de la variation de masse est effectué par des pesées de l'assemblage coupelle-échantillon toutes les 24 heures, à l'aide d'une balance de précision à 0,001 g près. La solution saline saturée (KNO₃ ou CaCl₂) assure une humidité relative constante au-dessous de l'échantillon à température constante.



Figure 5. Coupelles de chanvre-amidon pour les mesures de perméabilité

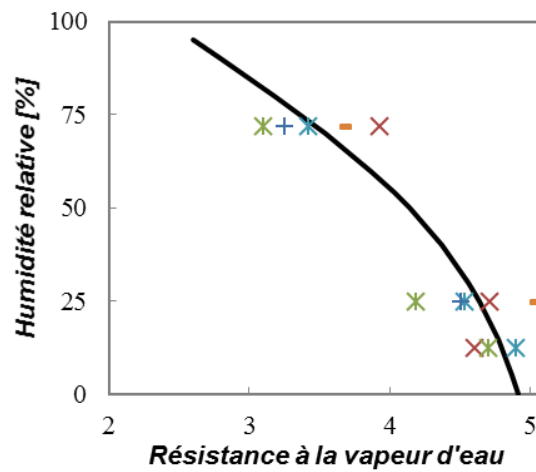


Figure 6. Résistance à la vapeur d'eau du composite chanvre-amidon

Deux essais ont été effectués dans deux conditions différentes : coupelle sèche (0% - 50 %) et humide (50 % - 93 %). Par ailleurs, la perméabilité à la vapeur d'eau δ présentée par l'équation 4 est calculée en appliquant la loi de Fick :

$$\delta = \frac{g * d}{\nabla p_v} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (5)$$

avec g ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) est le flux de vapeur à travers l'échantillon d'épaisseur d (m) et ∇p_v est le gradient de pression de part et d'autre de l'échantillon. μ est la résistance à la vapeur d'eau et δ_a ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) est la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air égale à $2 \times 10^{-10} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$.

Les valeurs expérimentales de la résistance à la vapeur d'eau sont ajustées par la formule analytique proposée ci-dessous par Roels *et al.*, (2010) w étant la teneur volumique en eau et φ l'humidité relative.

$$w = \frac{1}{0,192 + 0,0107 * e^{3,03*\varphi}} \quad (6)$$

3.4. Conductivité thermique

La conductivité thermique du chanvre-amidon est mesurée par la méthode fluxmétrique, en respectant la norme ISO 8301 (AFNOR, 1991). Le principe de cette mesure repose sur le lien entre le flux de chaleur traversant le matériau et le gradient de température qu'il génère, lorsque la totalité du flux de chaleur passe par l'échantillon. L'une des extrémités de l'échantillon est fixée à un doigt froid (bain thermique) dont le rôle est d'évacuer le flux thermique traversant l'échantillon tandis que l'autre extrémité est fixée à une chauffelette dissipant dans l'échantillon une puissance électrique Q obtenue par effet Joule, de manière à produire un gradient thermique suivant la longueur L de l'échantillon. La conductivité thermique λ sera ainsi calculée par :

$$\lambda (\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}) = \frac{Q L}{A \Delta T} \quad (7)$$

À 50 % d'humidité relative et à 23 °C, la conductivité thermique mesurée est $0,06 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ pour les échantillons non traités et $0,08 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ pour ceux traités. Dans les travaux précédents, les mesures de la conductivité du chanvre-chaux sous des conditions d'hygrométrie différentes ont été effectuées par Cerezo (2005) et Collet (2004). Selon les résultats pour une masse volumique $\rho = 450 \text{ kg m}^{-3}$, la conductivité augmente de 10 %, passant de 0,1 à $0,11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une humidité relative passant de 0 à 50 %. Comparé au chanvre-chaux, le chanvre-amidon montre une conductivité thermique inférieure, de même que sa masse volumique sèche (220 kg/m^3).

3.5. Capacité calorifique

La capacité calorifique du composite chanvre-amidon est mesurée en utilisant un calorimètre Calvet C80 de Setaram Instrumentation. Dans le détecteur calorimétrique, l'échantillon et la cellule de référence sont totalement entourés par une matrice de thermocouple assurant la mesure de la chaleur dégagée par rayonnement, convection et conduction. Le détecteur Calvet est efficace jusqu'à

94 % avec une précision thermique et calorimétrique d'environ $\pm 0,05 \%$ et $\pm 0,01 \%$, respectivement. La figure 7 montre la variation de la capacité thermique en fonction de la température. À la température ambiante 20 – 25 °C, la capacité calorifique varie entre 1,216 et 1,264 $\text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. À 23 °C, elle atteint 1,275 $\text{g J}^{-1} \text{K}^{-1}$.

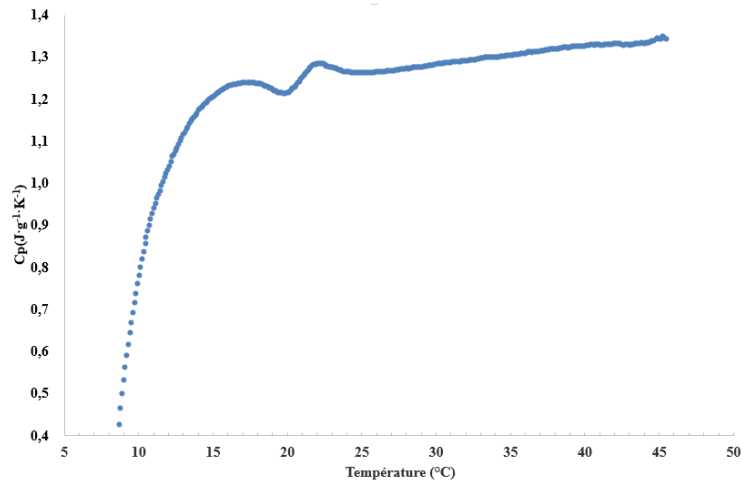


Figure 7. Capacité calorifique du composite chanvre-amidon

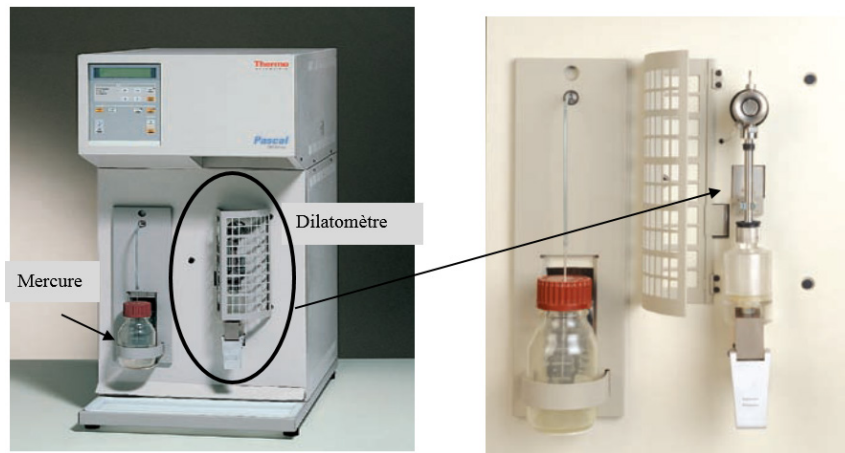


Figure 8. Porosimètre à mercure (Thermo Scientific)

3.6. Porosité

Afin de caractériser la structure poreuse du composite chanvre d'amidon, la technique de la porosimétrie au mercure proposée par Leon y Leon (1998) est

utilisée. La mesure de la distribution de taille des pores est effectuée avec un porosimètre à mercure fourni par Thermo Scientific présenté dans la figure 8.

Le principe est basé sur la pénétration du liquide (mercure) dans les petits pores cylindriques de l'échantillon sous l'effet de la pression. Cette pression peut être destructive pour certains matériaux, à savoir des poudres non compactées. Or, ce n'est pas le cas pour le chanvre/amidon. Le dispositif expérimental commence par le dégazage de l'échantillon, qui est déjà pesé et placé dans le dilatomètre, sous vide pendant un certain temps (de 10 à 20 minutes). Le dilatomètre est vissé grâce à une petite quantité de graisse qui garantit qu'il n'y aura aucune fuite. Lorsque le vide minimal est atteint, le système procède à l'opération de remplissage de mercure jusqu'au niveau de volume requis qui est prédéfinie à 1550 mm³. Enfin, l'analyse débute et la pression augmente avec une vitesse allant de 5 à 17 kPa/min. Lorsque la pression maximale de 400 kPa est atteinte, la dépressurisation commence avec une vitesse de 6-19 kPa/min et peut aller jusqu'à la pression du vide. À la fin de l'analyse, le dilatomètre rempli de mercure est pesé afin de déterminer la masse de l'échantillon, du mercure et du dilatomètre sans la graisse.

La masse de l'échantillon utilisé est 0,751 g. L'angle de contact mercure/échantillon est 140 ° et la tension superficielle de mercure est environ 0,48 N/m. La relation entre l'angle de contact et la tension superficielle est exprimée par l'équation de Washburn :

$$d = - \frac{4\sigma \cos\theta}{P} \quad (7)$$

où P est la pression hydrostatique nécessaire pour remplir les pores, θ est l'angle de contact et σ la tension superficielle. Les mesures sont décrites en termes de paramètres appropriés : la densité moyenne (m/V où V est le volume des particules, du vide inter-particule et celui du pore), la densité absolue, la porosité par intrusion en d'autres termes la porosité totale et la porosité ouverte. Une récapitulation est présentée dans le tableau 5.

Tableau 5. Propriétés de la structure poreuse du chanvre-amidon

Densité moyenne (g/cm ³)	0,3914
Densité absolue (g/cm ³)	1,3917
Porosité par intrusion Hg (%)	71,88
Porosité ouverte	73,04
Porosity inaccessible (%)	1,17
Volume de remplissage mm ³	1545

La densité moyenne de composite chanvre-amidon est estimée à 0,3914 g cm⁻³. Il s'avère que cette valeur est relativement basse par rapport à la densité d'autres composites poreux tels que le mortier de chanvre (0,44 g cm⁻³) mesuré par Collet *et*

al. (2008). La densité apparente est $1,3917 \text{ g cm}^{-3}$ et la porosité totale est d'environ 71,88 % avec une porosité inaccessible de 1,17 %. La figure 9 montre la variation de l'intrusion différentielle logarithmique ($dV/d\log(D)$) et du volume du pore cumulatif en fonction du diamètre des pores. Les résultats révèlent un pic dans la zone de macropores ($d > 0,05 \mu\text{m}$), le pic le plus important correspond au diamètre $0,9353 \mu\text{m}$ affecté à la chènevotte. Les autres pics sont de l'ordre de millimètre ($707,1 \mu\text{m}$ et $1000,5 \mu\text{m}$) et correspondent à l'espace dû à l'arrangement imparfait entre la chènevotte et la matrice. Il convient de noter que la majeure partie des pores correspond à des macropores avec 95,55 % du volume. Par ailleurs, le diamètre de pore moyen est environ $0,75 \mu\text{m}$.

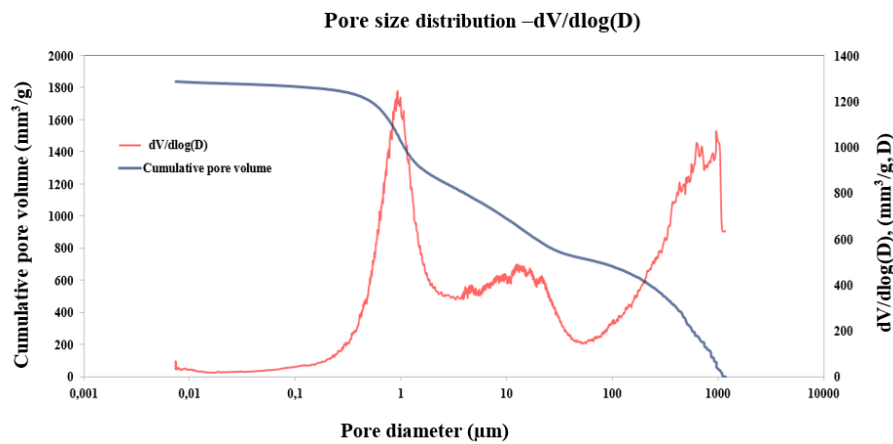


Figure 9. Distribution de la taille des pores

4. Conclusion et perspectives

Dans cet article un éco-composite à base de chanvre et d'amidon de blé est présenté. Les résultats expérimentaux des propriétés hygrothermiques révèlent que le chanvre-amidon pourra être une solution prometteuse dans le domaine de l'isolation des bâtiments neufs et existants en l'utilisant comme isolant thermique avec une conductivité thermique de $0,08 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une capacité calorifique d'environ $1,275 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 23°C . Sa capacité à réguler l'humidité ($3,39 \text{ g m}^{-2} \% \text{RH}^{-1}$) permet d'atténuer les variations d'humidité relative intérieure et donc d'obtenir un meilleur confort. L'analyse de la structure poreuse par un porosimètre à mercure montre une structure poreuse principalement constituée des mésopores et des macropores. Une simulation numérique accompagnée d'une expérimentation grande échelle pour étudier l'évolution de l'aspect thermique et hygrique à l'échelle de la paroi.

Bibliographie

- AFNOR (2001a). Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties, NF EN ISO standard 12572.
- AFNOR NF EN ISO 12572 (2001b). Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, NF EN ISO standard 12572.
- AFNOR, Norme ISO 8301 (1991). Isolation thermique. Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire. Méthode flux métrique.
- Alix S., Philippe E., Bessadok A., Lebrun L., Morvan C., Marais S. (2009). Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres. *Bioresource Technology*, vol. 100, n° 20, p. 4742-4749.
- Bajpai S.K., Chand N., Lodhi R. (2011). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of sago starch film. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, vol 4, n° 4, p. 233-246.
- Celino A., Freour S., Jacquemin S., Casari F &P. (2014). The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. *Frontiers in Chemistry*, vol. 1, n°43, p. 1-12.
- Cerezo V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de l'ENTPE.
- Cerolini S., D'Orazio M., Di Pema C., Stazi A. (2009). Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. *Energy and Buildings*, vol. 41, p. 164-168.
- Collet F., Pretot S. (2012). Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and building materials*, vol. 36, p. 58-65.
- Collet F., Chamoin J., Pretot S., Lanos C. (2013). Comparison of the hygric behavior of three hemp concretes. *Energy and buildings*, vol. 62, p. 294-303.
- Collet F., Pretot S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, vol. 65, p. 612-619.
- Collet F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux à faibles impacts environnementaux*. Thèse de l'INSA de Rennes.
- Collet F., Bart M., Seeres L., Miriel J. (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and buildings materials*, vol. 22, p. 1271-1280.
- Daian J.F. (1986). *Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux. Etude expérimentale du mortier de ciments s1*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, USTMG/INPG, 329.
- Evrard A., De Herde A. (2005), Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete, In *CISBAT 2005*, p. 25-30, Lausanne, Suisse.
- Gram H. E. (1988). *Durability of natural fibres in concrete natural fibre reinforced cement and concrete*, UK, Blackie and Son Ltd.
- Guessasma S., Bassir D., Hedjazi L. (2015). Influence of interphase properties on the effective behaviour of a starch-hemp composite. *Materials & Design*, vol. 65, p.1053–1063.

- Le A.T., Gacoin A., Li A., Mai T.H., El Wakil N. (2015). Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite materials. *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, p. 201–211.
- Leon y Leon C.A. (1998). New perspectives in mercury porosimetry. *Advances in Colloid and Interface science*, vol. 76-77, p. 341-342.
- Merakeb S., Dubois F., Petit C. (2008). Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood Science Technology*, vol. 43, p. 575-589.
- Nguyen T. T., Picandet V., Amziane S., Baley C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 13, p.1039–1050.
- Park G.S. (1986). Transport Principles—Solution, Diffusion and Permeation in Polymer Membranes. *NATO ASI Series*, vol. 181, p. 57-107.
- Rode C. (2005). *Moisture buffering of building materials*. Report BYG DTU R-126, ISSN 1601–2917.
- Roels S., Talukdar P., James C., Simonson C. J. (2010). Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, n°23-24, p. 5355-5363.
- Shea A., Lawrence M., Walker P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and Building Materials*, vol. 36, p. 270-275.
- Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T. (2004). Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I – field measurements. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 28, n°1, p. 63–101.
- Sing K.S. W. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface to the determination of surface area and porosity, *Pure and Applied Chemistry*, vol. 57, n° 4, p. 603-619.
- United Nation Environment Program (2016). *Environment for development*. <http://www.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp>.
- Umurigirwa B.S., Tigzer L., Dony P., Mai T.H., Maalouf C. (2013). Influence of chemical treatments on the properties of green composites based on hemp fibers and starch. *6th international wood fibre polymer composites symposium*, p. 23-24, Biarritz, France.
- Umurigirwa B.S. (2014). *Elaboration et caractérisation d'un agromatériau chanvre-amidon pour le bâtiment*. Thèse de l'Université de Reims Champagne Reims.
- Umurigirwa B.S., Vroman I., Mai T.H., Maalouf C. (2015). Influence of chemical modification on hemp–starch concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 81, p. 208–215.