

Caractérisation thermo-hydrrique d'agro-matériaux à base de chanvre

Thomas PIERRE^{1*}, Thibaut COLINART¹

¹Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB) – EA4250
Université de Bretagne-Sud, Université Européenne de Bretagne
Rue de Saint Maudé, BP 92 116, 56 321 Lorient Cedex
(*auteur correspondant : thomas.pierre@univ-ubs.fr)

Résumé - Pour faire face aux défis énergétique et climatique, le secteur du bâtiment s'oriente vers des matériaux biosourcés, notamment à base de chanvre. Ces derniers sont obtenus en mélangeant un liant à base de chaux, des particules de chanvre et de l'eau suivant différentes formulations et différents procédés. Une approche par tomographie X menée sur des matériaux fabriqués au laboratoire montre une forte porosité, hétérogénéité et anisotropie. Le caractère hygroscopique est également mis en avant par l'établissement des courbes de sorption. Ces différents aspects peuvent avoir des répercussions sur le comportement thermique. L'objet de la présente communication est ainsi d'évaluer expérimentalement les propriétés thermiques effectives de ces matériaux sur des gammes d'humidités relatives et de températures (y compris négatives) représentatives des conditions d'usage. La capacité calorifique est estimée à l'aide d'un microcalorimètre et d'une loi de mélange, alors que la technique transitoire rapide du fil chaud a été préférée pour la détermination de la conductivité et la diffusivité thermiques.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$	T	température, K
c_p	chaleur massique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	w	teneur en eau, $kg \cdot kg^{-1}$
d	diamètre, m	<i>Symboles grecs</i>	
l	longueur, m	λ	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
HR	humidité relative, -	ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
R	résistance électrique, Ω	Φ	puissance thermique, W
R_{th}	résistance de contact thermique, $K \cdot W^{-1}$	ω	fraction massique, -

1. Introduction

Responsable d'une grande contribution économique, mais aussi des gaz à effets de serre, le secteur de la construction tend vers des solutions écologiques et durables, comme en témoignent les labélisations croissantes de type HQE [1]. Les agro-matériaux à base de chanvre représentent une des solutions pour répondre à ces défis. En effet, une méthode d'analyse de cycle de vie a été appliquée et montre un impact favorable de ces matériaux sur l'effet de serre (stockage de CO₂) et de faibles impacts environnementaux (épuisement des ressources, peu de déchets, consommation énergétique, épuration des sols) [2].

Les matériaux à base de chanvre sont des matériaux composites obtenus en mélangeant un liant à base de chaux, des particules de chanvre (ou chènevotte) et de l'eau. Habituellement mis en œuvre suivant une technique de banchage sur une ossature en bois, le béton de chanvre est actuellement mis en œuvre soit par projection sur site, soit à l'aide de blocs préfabriqués.

Pour couvrir les nombreux domaines d'applications dans la construction (dalles de béton léger, remplissage d'ossature bois, enduit de finition, etc.), différentes formulations sont développées en variant les proportions entre la chènevotte et le liant ou en intégrant des additifs spécifiques (pouzzolane, etc.).

Les matériaux ainsi obtenus présentent des structures et des caractéristiques hydriques, mécaniques et thermiques variables. Collet [3] a montré le caractère poreux et hygroscopique de ces matériaux. En particulier, l'existence d'une triple porosité, à l'échelle de la particule végétale, à l'échelle du liant et à l'échelle macroscopique, a été mise en avant, fixant ainsi le volume élémentaire représentatif à $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Sur un plan mécanique, ces matériaux possèdent un comportement élasto-plastique, avec une faible résistance en compression et un faible module de rigidité, ne permettant pas pour l'instant d'en faire un matériau porteur [4]. Enfin, Prétot *et al.* [5] montrent que la conductivité thermique de ces matériaux à température ambiante (23 °C, 50 %) est relativement faible ($0,09 < \lambda < 0,14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et dépend de la formulation et du procédé employé. La dépendance de la conductivité thermique à l'humidité dans le matériau a également été constatée [3].

Toutefois, l'ensemble de ces données a été obtenu sur des matériaux différents. L'objectif de ce travail consiste à compléter cet ensemble de données structurales, hydriques et thermiques sur les matériaux à base de chanvre en travaillant toujours sur le même échantillon, permettant ainsi de s'affranchir des hétérogénéités de production. Plus particulièrement, on s'attache à quantifier expérimentalement la dépendance à la température et à l'humidité relative des propriétés thermiques et hydriques.

2. Présentation du matériau et du dispositif expérimental

Dans cette étude, le béton de chanvre est obtenu par projection selon la technique de mise en œuvre suivante : un mélange de liant et de chènevotte est brassé à sec, puis transporté sous pression dans une conduite et enfin projeté sur un support, l'apport d'eau se faisant uniquement au niveau de la buse de projection [6]. Ici, le matériau contient 17 % en masse de chènevotte de type Chanvribat, 33 % en masse de liant à base de chaux de type Tradical Pf70 et 50 % en masse d'eau pour respecter une composition de type Mur. Un des échantillons de béton de chanvre projeté est présenté sur la Figure 1, sur laquelle on identifie la chènevotte recouverte de liant.

La masse volumique du béton de chanvre a été mesurée par pesée et prise de dimensions, technique présentant une incertitude inférieure à 2 % [3]. Immédiatement après projection, elle est de l'ordre de 550 à $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, puis atteint une valeur d'environ $470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ après séchage dans des conditions ambiantes (23 °C, 50 %), la masse volumique sèche étant de $440 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette dernière est comparable aux valeurs rencontrées dans le cas du béton de bois ou du béton cellulaire [7, 8]. Enfin, le matériau ayant été fabriqué environ deux ans avant cette étude, il est permis de s'affranchir des phénomènes d'hydratation et de carbonatation et de le supposer comme stabilisé au niveau de sa structure.

Initialement de grandes dimensions pour faciliter leur manutention, le matériau a été redimensionné sous forme de deux blocs parallélépipédiques d'environ $10 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$, pour lesquels trois directions $O\vec{x}$, $O\vec{y}$ et $O\vec{z}$ peuvent être définies. La direction $O\vec{y}$ représente celle du transfert de chaleur dans une paroi verticale entre l'intérieur et l'extérieur dans des conditions d'usage (voir Figure 2). Ces deux blocs sont employés pour deux expérimentations. La première consiste à faire évoluer à température ambiante (23 °C) par paliers l'humidité relative HR dans un dessiccateur entre 9 % et 60 % à l'aide de solutions salines saturées. Pour la seconde, le bloc est conditionné dans une enceinte climatique où la consigne de température T est imposée à une valeur comprise entre -10 °C et 30 °C pour une humidité relative fixée à 50 %. Dans les deux cas, le matériau va se mettre en équilibre avec son environnement, se traduisant par une stabilisation de sa masse.

3. Structure et hygroscopicité

3.1. Propriétés structurales

La Figure 1 permet d'identifier l'existence d'une porosité, en surface *a minima*. Une étude quasi exhaustive sur un matériau similaire au bloc projeté a permis de mesurer des porosités ouvertes de l'ordre de $78 \% \pm 2 \%$ [3]. Cette porosité se répartit en trois familles principales de pores : une première autour de $0,1 \mu\text{m}$ (caractéristique de la chènevotte), une seconde autour de $10 \mu\text{m}$ (caractéristique du liant) et la dernière étant représentative des macroporosités. Une étude par tomographie X réalisée au Centre de Ressource Technique de Morlaix permettant de reconstruire le volume confirme le caractère poreux du béton de chanvre. En particulier, la coupe proposée sur la Figure 3 permet de visualiser la macroporosité directement au cœur du matériau, les méso et micro-porosités ne pouvant être détectées compte tenu de la taille de l'échantillon et de la résolution du tomographe (quelques μm pour cette expérience). De plus, elle révèle une certaine hétérogénéité et anisotropie en son sein. En effet, le béton de chanvre étant mis en œuvre par projection, les premières particules projetées ont tendance à être plus compactées que les dernières, confirmant les hétérogénéités observées par Elfordy *et al.* [6] sur un matériau similaire. De même, une orientation privilégiée des fibres dans le matériau semble se dégager. Ceci peut s'expliquer par le fait que, lors de la projection, les particules de chanvre tendent à s'orienter selon une direction perpendiculaire à la direction de projection sous l'effet des nouvelles particules projetées.

3.2. Propriétés hydriques

Les matériaux poreux, de porosité ouverte, ont la propriété de fixer les molécules d'eau de l'air environnant : c'est le phénomène de sorption. Pour estimer la quantité d'eau contenue dans le béton de chanvre, la teneur en eau w est déterminée à partir de la masse volumique à l'équilibre et sèche par :

$$w = (\rho_{brute} - \rho_{sec}) / \rho_{sec} . \quad (1)$$

Pour cet échantillon de béton de chanvre, une augmentation de l'humidité relative entre 0 et 60 % entraîne une augmentation de leur masse volumique apparente, et donc de la teneur en eau comme l'attestent les résultats de la Figure 4. Cette courbe d'adsorption est très proche de celle obtenue à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ par Collet sur un matériau similaire [3]. Pour ces isothermes en S, l'augmentation de la teneur en eau s'explique par la fixation d'abord monocouche, puis multicouche des molécules d'eau jusqu'à atteindre un seuil de condensation capillaire au-delà duquel les pores se remplissent alors progressivement d'eau liquide. De manière analogue, la teneur en eau passe de 0,025 à $23 \text{ }^\circ\text{C}$ à 0,015 à $0 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une humidité relative maintenue à 50 %. Cette baisse avec la température s'explique par une diminution de la quantité d'eau adsorbée physiquement en raison du caractère exothermique du phénomène d'adsorption, mais aussi par une augmentation, au niveau des pores, du seuil de condensation capillaire [3].

4. Propriétés thermiques

4.1. Présentation des dispositifs de caractérisation

Les propriétés thermiques que sont la conductivité λ , la diffusivité a et la chaleur spécifique ρc_p , sont déterminées expérimentalement par la technique pseudo-transitoire du fil

chaud. Le fil, de longueur $l = 13$ cm, de diamètre $d = 2,5$ mm et de résistance $R = 10 \Omega$, est inséré sur toute sa longueur dans le bloc préalablement percé au centre de chacune de ses surfaces. L'expérience consiste à délivrer un courant $I = 0,230$ A et à dissiper une puissance produite par effet Joule Φ ($\Phi = RI^2$) dans le bloc initialement isotherme, et à enregistrer l'évolution temporelle de la température du fil à l'aide de trois thermocouples type K. Un modèle analytique exact (2) est confronté et ajusté aux points expérimentaux en estimant la conductivité, la diffusivité et la résistance de contact R_{th} par une méthode des moindres-carrés couplée à un algorithme de type Levenberg-Marquardt [9]. Ce modèle théorique, dont $\gamma = 0,577 21$ est la constante d'Euler, s'applique aux temps longs lorsque l'évolution de $T(t) - T_0$ devient linéaire en fonction de $\ln(t)$.

$$T(t) - T_0 \approx \frac{\Phi}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \Phi \left[R_{th} - \frac{\ln\left(\frac{d}{2\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right]. \quad (2)$$

Par ailleurs, l'estimation de la conductivité et de la diffusivité permet d'obtenir la chaleur spécifique apparente ($\rho c_p = \lambda/a$). Celle-ci est comparée à deux mesures microcalorimétriques indépendantes du c_p du béton de chanvre sec. La première est réalisée sur plusieurs échantillons du produit fini. La seconde résulte de la loi de mélange (3) :

$$(\rho c_p)_{\text{béton}} = \rho_{app} (\omega_{liant} \rho c_{p,liant} + \omega_{pv} \rho c_{p,pv}). \quad (3)$$

4.2. Influence de l'humidité sur les propriétés thermiques

Sur une gamme allant de 9 % à 45 %, la conductivité thermique du béton de chanvre augmente avec l'humidité relative, même si cette tendance n'est pas toujours très nette (voir Figure 5). Cette augmentation s'explique par la présence de plus en plus importante d'une phase liquide dans le matériau, plus conductrice de la chaleur que les phases gazeuse et solide. De plus, il est constaté que les valeurs de conductivité mesurées selon la direction $O\vec{z}$, qui est aussi la direction de projection, sont plus faibles que pour les autres directions. Les fibres étant orientées perpendiculairement à la direction de projection, la chaleur se propage de fibres en fibres suivant cette direction et longitudinalement dans les autres directions.

4.3. Influence de la température sur les propriétés thermiques

Le Tableau 1 et la Figure 6 regroupent les résultats des mesures effectuées selon les trois directions pour chaque palier de température et ceux obtenus à l'aide du microcalorimètre. D'après la Figure 6, il apparaît clairement que la conductivité thermique augmente avec la température, ceci quelle que soit la direction de mesure. En revanche, les valeurs mesurées suivant la direction $O\vec{z}$ sont environ 30 % plus faibles que celles des directions $O\vec{x}$, et $O\vec{y}$.

Les résultats sur la diffusivité thermique et la chaleur spécifique sont plus dispersés, et il est difficile d'observer une tendance nette avec la température (voir Tableau 1). Le déplacement du fil entre les trois directions modifie pour chaque mesure les conditions de contact entre le fil et le matériau et peut donc pénaliser l'estimation. Pour s'affranchir de ce type d'erreur, l'idéal est évidemment un fil inamovible par direction et par bloc. Néanmoins, même si elle n'est pas reproductible entre chaque mesure, l'estimation de la résistance thermique R_{th} donne systématiquement des valeurs proches de l'unité gageant de la reproductibilité des résultats.

En revanche, la comparaison entre la chaleur spécifique apparente estimée et celles mesurées par les méthodes indépendantes du microcalorimètre montre une convergence vers une valeur commune. L'erreur sur le calcul de la chaleur spécifique est basée principalement sur les compositions fournies par les industriels et peut être estimée à environ 5 %.

		T (°C)						
		-10	-5	0	5	10	20	30
selon $O\bar{x}$	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,111	0,121	0,127	0,127	0,139	0,142	0,146
	a ($10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	1,9	2,7	2,9	1,7	2,8	3,4	1,7
	ρc_p ($10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	5,8	4,5	4,5	7,6	5,0	4,2	8,5
selon $O\bar{y}$	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,127	0,130	0,137	0,139	0,140	0,149	0,159
	a ($10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	1,9	2,9	3,5	2,8	2,2	1,9	1,4
	ρc_p ($10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	6,7	4,5	3,9	5,0	6,5	7,8	11,4
selon $O\bar{z}$	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,086	0,094	0,089	0,094	0,097	0,104	0,126
	a ($10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	2,7	2,3	2,4	2,4	3,0	3,1	3,8
	ρc_p ($10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	3,1	4,2	3,7	4,0	3,3	3,3	3,4
liant chênevotte cf. éq. (3)	c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)			879	888	898	917	927
	c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)			1 264	1 281	1 314	1 369	1 419
	$\rho_{app}c_p$ ($10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)			4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
moyenne béton cf. éq. (3)	c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)			967	999	1 014	1 041	1 082
	$\rho_{app}c_p$ ($10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)			4,5	4,7	4,8	4,9	5,0

Tableau 1 : Synthèse des mesures effectuées à humidité relative fixée à 50 % et comparaison avec celles du microcalorimètre.

5. Conclusion

Cette communication présente un ensemble complet de résultats obtenus sur un seul et même matériau à base de chanvre. Les études structurales indiquent que ce sont des matériaux poreux, hétérogènes et anisotropes, et la forte porosité ouverte implique également une forte hygroscopicité. Porosité et hygroscopicité ont une influence sur les propriétés thermiques, comme cela a pu être constaté dans la littérature. La deuxième série de mesures montre également l'influence de la température sur les propriétés thermiques, y compris dans le domaine des températures négatives. Ces données permettront d'alimenter des simulations dynamiques de parois ou de bâtiments dans des conditions d'usage. À court terme, d'autres matériaux à base de chanvre seront exploités selon le même protocole et autoriseront la comparaison entre les procédés et les formulations de fabrication. Parallèlement, une étude plus approfondie de la structure et de l'organisation des particules végétales aidera à la définition d'un modèle prédictif des propriétés thermophysiques.

Références

- [1] S.Hallyday, *Sustainable construction*, Burlington, MA, Elsevier (2008).
- [2] M.P. Boutin *et al.*, *Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*, Paris, Ministère de l'agriculture et de la pêche (2006).
- [3] F. Collet, *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*, Thèse de Doctorat, INSA de Rennes (2004).
- [4] V. Cérézo, *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, ENTPE (2005).

- [5] S. Prétot *et al.*, *Variations des propriétés thermiques des bétons de chanvre en fonction de la formulation*, Colloque SFT, Vannes, (2009).
- [6] S. Elfordy *et al.*, *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process*, *Construction and Building Materials* 22(10) 2116-2123 (2008).
- [7] C. Becchio *et al.*, *Improving environmental sustainability of concrete products: Investigation on MWC thermal and mechanical properties*, *Energy and Buildings* 41 (2009) 1127-1134.
- [8] Y. Jannot *et al.*, *Thermal conductivity of insulating materials with a three layer device*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 1105-1111.
- [9] Y. Jannot, *Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Bordeaux I (2006).



Figure 2 : Béton de chanvre obtenu par projection

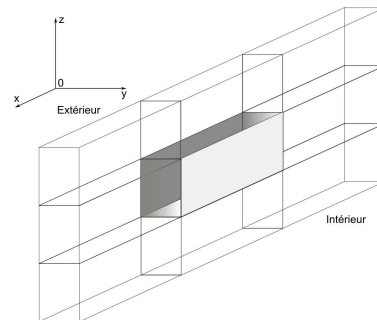


Figure 1 : Représentation d'un mur de béton de chanvre dans des conditions d'usage..

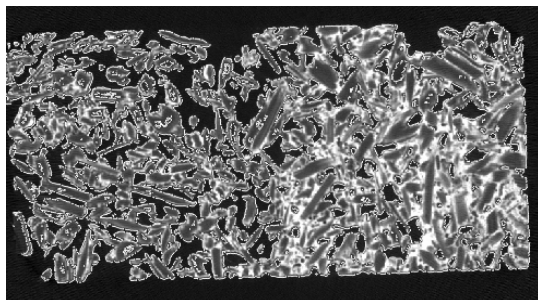


Figure 3 : Image en coupe obtenue par tomographie X.

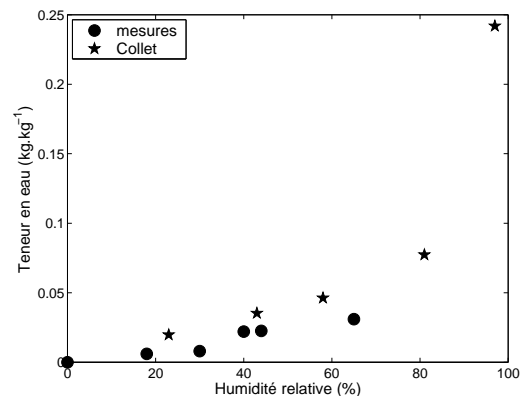


Figure 4 : Courbes d'adsorption.

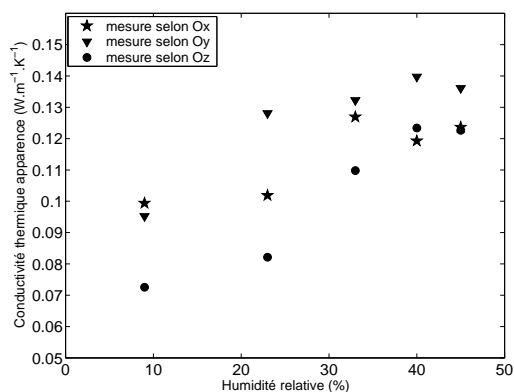


Figure 5 : Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative.

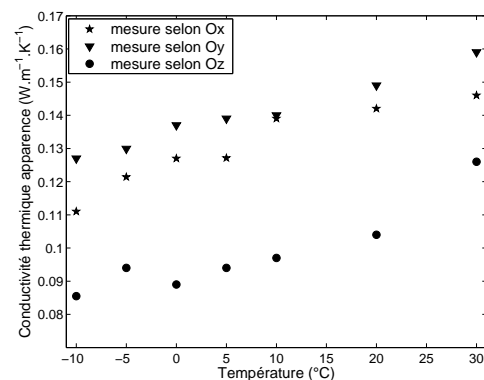


Figure 6 : Conductivité thermique en fonction de la température.