
La porosité au service du confort intérieur

Phelipot-Mardelé A. et Lanos C.

Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique, équipe MTRhéo, 3 rue du Clos Courtel, 35704 Rennes Cedex 7

Annabelle.phelipot@univ-rennes1.fr

Christophe.Lanos@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ. Le béton de chanvre est composé de liant minéral et de fibres de chanvre. Les caractéristiques principales de tels bétons sont leurs propriétés hydrique et isolante très intéressantes. Cette étude entre dans le cadre du projet européen ISOBIO. L'un des enjeux est la contribution de la chaux dans les propriétés thermo-hydriques du béton de chanvre. Le présent article s'intéresse en particulier à la chaux commerciale Thermo®, BCB. Des mousses minérales ont été fabriquées à partir de ce liant minéral. Des densités comprises entre 500 kg/m³ et 1100 kg/m³ ont été atteintes. Après stabilisation massive, des essais de conductivité thermique et de Moisture Buffer Value ont été réalisés. Les résultats obtenus sur la chaux sont très intéressants. Des conductivités thermiques comprises entre 0.11 et 0.25 W/(m.K) ont été obtenues, pour des valeurs de MBV respectivement de 2.5 à 1.9 g/(m².HR%). Les mousses de chaux fabriquées apparaissent comme de bons régulateurs hydriques, avec des valeurs de MBV semblables à celles du béton de chanvre. Les bulles d'air peuvent donc remplacer avantageusement les fibres de chanvre.

ABSTRACT. Hemp lime concrete is a mix of hemp shiv glued in a mineral binder. Such concrete is characterised by low thermal conductivity and interesting hygric properties. The aims of this study realized in the frame of ISOBIO Project are to understand the contribution of the lime to the thermo-hygric properties. The study focuses on the case of a commercial lime based binder (Thermo®, BCB). The measurements of thermal conductivity and Moisture Buffer Value are performed on samples realized with Thermo® lime matrix foamed to achieve sufficiently low densities ranging from 500 kg/m³ to 1100 kg/m³. The results obtained on lime component for this range of densities are full of interest: thermal conductivity ranges between 0.11 to 0.25 W/(m.K) and respectively Moisture Buffer Value between 2.5 to 1.9 g/(m².RH%). Tested lime foams appear as excellent hygric regulator, with same MBV value of traditional hemp lime concrete. Bubbles can replace opportunely the hemp shiv.

MOTS-CLÉS : béton de chanvre, mousse minérale, chaux, conductivité thermique, Moisture Buffer Value.

KEY WORDS : hemp lime concrete, mineral foamed, lime, thermal conductivity, Moisture Buffer Value.

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet européen ISOBIO qui cherche à développer de nouveaux matériaux de construction isolants à base de composants bio-sourcés tels que le blé, le colza, le chanvre, le lin et les rafles de maïs. L'objectif visé prévoit de réduire l'énergie grise associée à de tels matériaux et de limiter les besoins énergétiques globaux des bâtiments tout en assurant un bon confort hygrothermique des usagers.

En présence de tels matériaux, le confort hygrothermique résulte d'un compromis entre un caractère isolant thermique et la capacité hydrique tampon. Cette capacité joue le rôle d'amortisseur lors des modifications de l'hygrométrie. Le béton de chanvre illustre un tel fonctionnement. C'est un matériau composite constitué d'une matrice minérale formulée généralement à partir d'une chaux et de charges végétales : la chènevotte (fragment de la paille de chanvre) [AMZ 13][BRU 13][TRA 10]. Un tel mélange présente une perméabilité à la vapeur d'eau et une porosité multi échelle particulièrement intéressante vis-à-vis des propriétés de transfert thermique et hygrique.

Afin de comprendre quel peut être l'apport de la matrice minérale d'un béton de chanvre sur ses propriétés, différents échantillons sont produits, à partir d'une chaux formulée commerciale. La technique de moussage utilisée permet d'atteindre, à l'état durci, des masses volumiques voisines de celles d'un béton de chanvre. La structure porale des échantillons puis la conductivité thermique et la valeur tampon hygrique (Moisture buffer value, MBV) des différentes mousses minérales produites sont analysées pour évaluer en quoi bulles d'air et granulats végétaux sont équivalents.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Formulation

L'intégralité des échantillons est réalisée avec une chaux formulée présentant un caractère hydraulique marqué : Tradical Thermo® –BCB. Le liant est mélangé avec de l'eau avec des proportions Eau sur Liant E/L évoluant entre 0.4 et 0.67. Afin de garantir une fluidité suffisante au mélange tout en limitant l'eau de gâchage, un fluidifiant SP20 - K&Co est ajouté (0.20% à 0.22% de la masse de liant). L'obtention d'une mousse à l'état pâteux est facilitée par l'introduction d'un tensioactif (Hostapur OSB - Clariant, dosage variant de 0.1% à 0.3% de la masse de liant) et l'ajout d'épaississant de type CMC (walocel - DOW Chemical) est parfois nécessaire pour assurer la stabilité de la mousse.

2.2. Méthode de moussage et production des échantillons

La méthode de moussage utilisée est de type « direct foaming » [SAM 15]. Cette méthode permet en général de former des mousses minérales avec des teneurs en eau assez basses, imposant des teneurs en tensio-actifs assez élevées. La mousse est générée par un mélangeage en une seule étape dans un malaxeur. Tous les composants sont mélangés ensemble pour obtenir une pâte minérale homogène dans le malaxeur équipé d'un fouet (vitesse rapide). Le malaxage permet d'emprisonner des bulles d'air dans la suspension concentrée, modifiant de ce fait la rhéologie de l'ensemble et permettant à la mousse de se créer et de se stabiliser [BUY -] [JUS 09]. Le temps de malaxage est modulé de façon à générer le volume de mousse minérale souhaité. Un calibrage de la durée de cette étape a été nécessaire pour pouvoir générer des mousses de masses volumiques durcies variées (entre 500 kg et 1 100 kg/m³). Les différentes mousses produites sont moulées à l'état frais dans des moules cylindriques (diamètre 80 mm, hauteur 200 mm). Le démoulage est généralement réalisé après 24 heures. Les échantillons sont conservés à 20 °C et 50 % HR pendant près de 9 mois. Les échantillons sont ensuite sciés pour produire les éprouvettes cylindriques d'élanement voisin de 1, destinées aux différentes mesures et analyses. Les surfaces des éprouvettes sont travaillées de façon à assurer leur planéité.

2.3. Techniques de caractérisation

Les paramètres mesurés pour évaluer les performances des mousses minérales produites sont des mesures de masse volumique apparente de la mousse à l'état frais, de la mousse minérale durcie, mais également des propriétés thermo hydriques : conductivité thermique et valeur tampon hygrique (MBV).

La mesure de la conductivité thermique a été réalisée à 23 °C, à l'état sec et à 50 % HR. Les mesures sont réalisées en régime transitoire avec une sonde fil de 50 mm. La sonde est placée entre deux éprouvettes planes. La conductivité thermique est évaluée par ajustement du modèle de transfert thermique sur l'enregistrement de l'élévation de température en fonction du temps. La puissance et le temps de chauffage sont ajustés de telle sorte qu'on obtienne une élévation de température suffisante (> 10 °C) et un coefficient de corrélation élevé. La précision de la mesure est de 5 %.

La valeur tampon hygrique est mesurée conformément au protocole décrit dans le Nordtest project [ROD 05]. Les éprouvettes sont étanchées sur toutes les faces à l'exception de la surface d'échange. Après stabilisation à 23°C et 50%HR, les échantillons sont soumis à des variations cycliques journalières d'humidité relative ambiante avec un cycle de 8 h à 75 % HR et 16 h à 33 % HR. Les essais sont réalisés dans une enceinte climatique Vöthch (VC4060). La valeur tampon hygrique est alors calculée à partir des variations de masse durant le cycle selon :

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_h - HR_b)} \quad [1]$$

Où Δm la prise/perte de masse (g), A la surface d'échange (m²) et $HR_{h/b}$ l'humidité relative haute/basse. La température et l'humidité relative sont mesurées en continu dans l'enceinte climatique grâce à des sondes SHT75 et grâce à la sonde de l'enceinte. Les vitesses d'air dans l'enceinte sont contrôlées au voisinage des échantillons et sont de l'ordre de 0.1 à 0.4 m/s en horizontal et inférieures à 0.15 m/s en vertical. Les échantillons sont pesés en dehors de l'enceinte cinq fois durant la phase d'adsorption et deux fois pendant la phase de désorption.

3. Résultats et discussions

3.1. Masse volumique en frais et en durci, Porosité

La structure porale de la mousse est visualisée par microscopie électronique (Figure 1). Les bulles présentent une taille comprise entre 10 µm et 0.5 mm. La connectivité entre bulles se limite généralement à une fissuration de la matrice minérale. La croissance de carbonates de calcium sur la surface des pores est constatée, montrant un état de carbonatation avancé. La porosité au sein de la matrice durcie est très fine (< 1 µm) mais largement connectée.

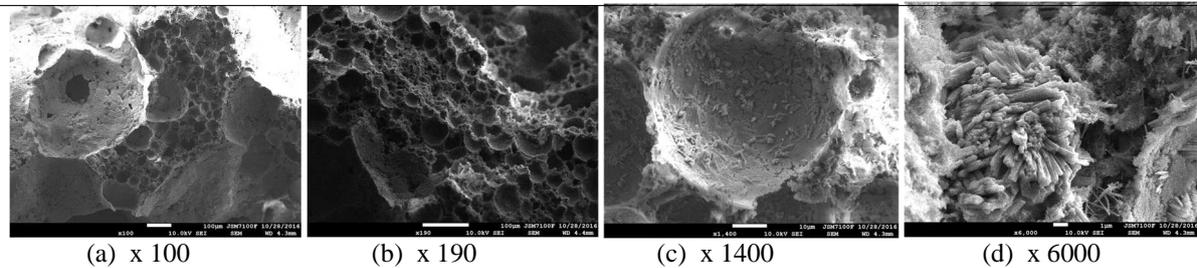


Figure 1. Vue au microscope électronique de la structure inter des mousses (a, b). Cristallisation de carbonates de calcium sur la surface d'une bulle (c). Structure interne de la matrice minérale (d).

Les masses volumiques de chaque échantillon de mousse minérale, en frais et en durci, permettent d'évaluer pour chaque composition la porosité associée aux bulles d'air générée par le moussage et la porosité associée à la matrice minérale. La somme des deux porosités permet d'évaluer la porosité totale. Lors de la fabrication des mousses on note dans certains cas une certaine perte de stabilité de la mousse qui se traduit par un effondrement partiel de la structure. Ce phénomène relève plus d'un effet de mûrissement (dégazage du matériau) que de coalescence. Il est ainsi possible d'évaluer la stabilité en frais de la mousse en analysant la relation entre la masse volumique à l'état frais avant mûrissement et après stabilisation.

3.2. Conductivité thermique

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des différentes mousses minérales réalisées est présentée Figure 2. Les résultats obtenus au point sec ou à 50% HR sont très voisins et l'écart de mesure reste largement inférieur à la précision de la mesure. L'évolution de la conductivité thermique avec la masse volumique des mousses minérales est remarquablement linéaire, les effets de modification de formulation étant ici peu visibles. Cette tendance est assez courante pour ce genre de matrice minérale [SAM 15] [SAM 16] et les mesures réalisées sur restent voisines de celles évaluées sur un béton de chanvre [COL 14].

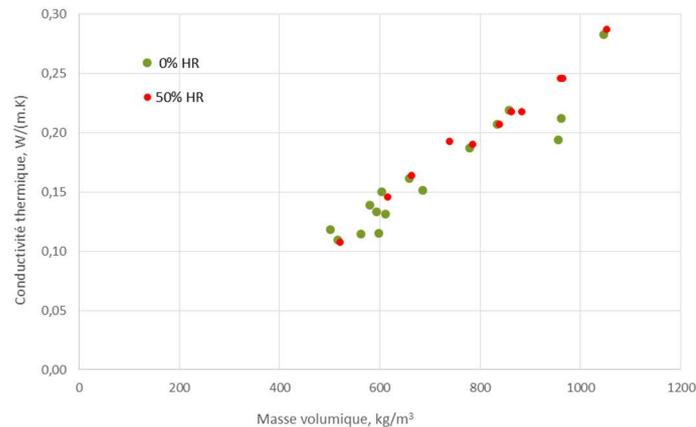


Figure 2. Evolution de la conductivité thermique (23 °C, 0 et 50 % HR) en fonction de la masse volumique.

3.3. MBV

La valeur tampon hygrique moyenne varie entre 1.99 et 2.45 g/(m².%HR). Selon la classification du Nordtest project [ROD 05] tous ces composites sont donc d'excellents régulateurs hygriques : MBV > 2 g/(m².%HR). Les résultats obtenus pour ces mousses sont globalement supérieurs aux meilleurs résultats obtenus pour des composites réalisés à base de chanvre-chaux pour lesquels les valeurs de MBV vont de 1.94 à 2.24 g/(m².%HR) [COL13] pour des masses volumiques toutefois inférieures. La figure 3(a) montre que la valeur tampon hygrique est une fonction globalement décroissante de la masse volumique. La dispersion des différents points reste à mettre au regard de la structure porale des différentes mousses. Il apparaît que la MBV évolue globalement linéairement avec la porosité totale p_T . Un modèle d'évolution linéaire, découplant la micro porosité p_M (porosité de la matrice minérale) de la macro porosité p_B (porosité liée aux bulles d'air) est proposé :

$$MBV = A.p_M + B.p_B \quad \text{et} \quad p_T = p_M + p_B \quad [2]$$

Pour valider cette relation, les points expérimentaux doivent s'aligner sur une droite dans le repère MBV/ p_B en fonction de p_B/p_M . Les résultats sont présentés sur la figure 3(b). On constate que les points sont remarquablement alignés ce qui valide le modèle et permet d'estimer A = 4.2 et B = 2.69 montrant ainsi que la microporosité est plus impactante sur la MBV que la macroporosité.

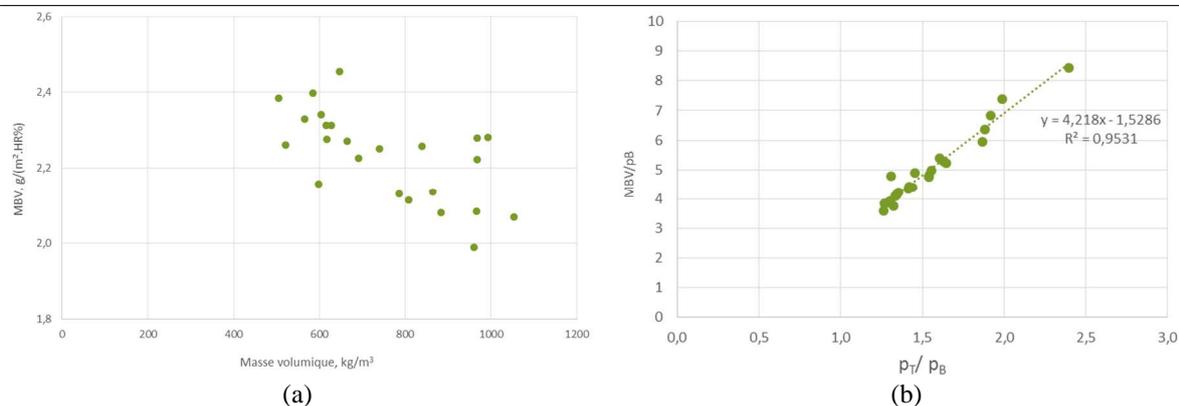


Figure 3. Evolution de MBV en fonction de la masse volumique des mousses minérales (a). Evolution du rapport MBV/ρ_B en fonction de ρ_T/ρ_B (b).

4. Conclusions

Les performances hygrothermiques évaluées sur les mousses minérales sont très satisfaisantes. Les conductivités thermiques sont du même ordre de grandeur que celle mesurées sur des bétons de chanvre, pour des masses volumiques comparables. Les valeurs hygriques tampons sont remarquablement élevées et globalement supérieures à celles mesurées sur des bétons de chanvre. Les bulles d'air s'avèrent plus profitables que la chènevotte. Les mousses minérales testées sont ainsi classées comme excellent régulateurs hygriques. Pour les mousses minérales, il apparaît que la valeur de MBV est plus directement dépendante de la microporosité que de la macro porosité. Ces deux échelles d'analyse vont directement conditionner la profondeur de pénétration de la vapeur lors de l'essai MBV. Produire un matériau favorable au confort de l'utilisateur peut donc reposer sur la formation d'une structure poreuse multi échelle en jouant sur l'eau de gâchage et la teneur en air. Les résultats présentés montrent qu'une mousse de chaux formulée peut satisfaire ces objectifs. Cependant, la stabilité des mousses lors de l'étape de fabrication est compromise lorsque le moussage est trop important ou la teneur en eau trop importante. Techniquement, la plus basse masse volumique de mousse minérale reste bornée à 500 kg/m^3 . Une conductivité thermique de 0.1 W/(m.K) et un MBV de $2.5 \text{ g/(m}^2.\% \text{HR)}$ constituent donc une forme de limite pour le couple « liant, technique de moussage » exploité dans cette étude. Il convient également d'intégrer dans la réflexion qu'un tel matériau doit présenter des performances mécaniques suffisantes pour sa manipulation et sa mise en œuvre. De telles performances resteraient à évaluer.

Cette étude a reçu des fonds de l'union européenne selon le programme Horizon 2020 (agrément n° 636835) Informations disponibles sur <http://isobioproject.com/>

5. Bibliographie

- [AMZ 13] AMZIANE S., ARNAUD L., Bio-aggregate-based Building Materials, Applications to Hemp Concrete, *ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc*, 2013
- [BRU 13] DE BRUIJN P., JOHANSSON P., Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete, *Construction and Building Materials*, 47, pp 1235-1242, 2013.
- [BUY -] Buyn K., Song H., Sark S., Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent, Department of civil engineering, Seoul, n.d.
- [COL 13] COLLET F., CHAMOIN J., PRÉTOT S., LANOS C., Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes, *Energy and Buildings*, 62, pp 294-303, 2013.
- [COL 14] COLLET F., PRÉTOT S., Thermal conductivity of hemp concretes: variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials*, 65, pp 612–619, 2014.
- [JUS 09] Just A., Middendorf B., Microstructure of high-strength foam concrete, *Material Characterisation*, vol. 60, 2009, p. 741–8.
- [ROD 05] RODE, C.; Moisture buffering of Building Materials, Report BYG•DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195, 2005.
- [SAM 15] Samson G., Synthèse et Propriétés des mousses minérales, thèse de doctorat, 2015, INSA de Rennes, France.
- [SAM 16] Samson G., Phelipot-Mardelé A., Lanos C., Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant, *EJECE*, DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601.
- [TRA 10] Tran Le A.D., Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, Novembre 2010.