
Composites chanvre-paille : performances hygriques et thermiques

F. Collet¹, S. Prétot², C. Lanos³

¹ Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Equipe Matériaux Thermo Rhéologie, Université de Rennes
1 IUT Génie Civil-Construction Durable - 3, rue du Clos Courtel, BP 90422, 35704 Rennes, France
florence.collet@univ.rennes1.fr

² Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Equipe Matériaux Thermo Rhéologie, Université de Rennes
1 IUT Génie Civil-Construction Durable - 3, rue du Clos Courtel, BP 90422, 35704 Rennes, France
sylvie.pretot@univ.rennes1.fr

³ Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Equipe Matériaux Thermo Rhéologie, Université de Rennes
1 IUT Génie Civil-Construction Durable - 3, rue du Clos Courtel, BP 90422, 35704 Rennes, France
christophe.lanos@univ.rennes1.fr

...

RÉSUMÉ. Le projet européen ISOBIO cherche à développer de nouveaux matériaux isolants biosourcés de manière à réduire l'impact environnemental des constructions. L'énergie grise de ces matériaux doit être faible de même que leur bilan carbone. Ils doivent également réduire les besoins énergétiques des bâtiments tout en assurant un bon niveau de confort thermique et hydrique pour les usagers. Cette étude s'intéresse à la valorisation des agro-ressources en tant que granulats et en tant que liant afin de produire des composites intégralement biosourcés. Les composites développés sont réalisés à base de chènevottes liées avec de la paille de blé. Après une étude de faisabilité qui considère plusieurs protocoles d'utilisation de la paille de blé comme liant et plusieurs ratios chanvre/paille, trois composites sont sélectionnés. Des échantillons sont fabriqués pour déterminer leurs performances hygrothermiques. Les propriétés mesurées sont intéressantes : leur conductivité thermique est faible (0.071 à 0.076 W/(m.K)) et les matériaux s'avèrent être d'excellents régulateurs hygriques ($MBV > 2 \text{ W/(m}^2 \cdot \%RH)$).

.....

ABSTRACT. The European project ISOBIO aims to develop new bio-based building insulating materials which contribute to reduce environmental impacts of buildings. The developed materials shall have low embodied energy and low carbon footprint and shall contribute to reduce energy needs of buildings and to ensure high hygrothermal comfort of users. This study investigates the valuation of agro resources as bio-based aggregates and as binding material to produce wholly bio-based composites. The developed composites are made of hemp shiv glued with wheat straw. After a feasibility study which investigates several ways to use wheat straw as a gluing material and several hemp to wheat straw ratio, three hemp-straw composites are selected. Specimens are produced to characterize thermal and hygric properties of developed composites. They show interesting thermal and hygric properties as they have low thermal conductivity (0.071 to 0.076 W/(m.K)) and they are excellent hygric regulators ($MBV > 2 \text{ W/(m}^2 \cdot \%RH)$).

MOTS-CLÉS : un maximum de six mots significatifs : isolants biosourcés, conductivité thermique, valeur tampon hygrique.

KEY WORDS: a maximum of six significant words: bio-based materials, 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. L'objectif visé prévoit de réduire l'énergie grise de ces matériaux et de limiter les besoins énergétiques globaux des bâtiments tout en assurant un bon confort hygrothermique des usagers. Deux types de produits seront développés dans le cadre du projet ISOBIO : d'une part des panneaux isolants et d'autre part des composites bio-sourcés pouvant être mis en œuvre sur site. Pour atteindre cet objectif, différentes ressources agricoles sont identifiées et pourraient être valorisées à la fois comme granulats bio-sourcés et comme liant. Cinq ressources sont prises en compte dans le projet ISOBIO : le blé, le colza, le chanvre, le lin et les rafles de maïs.

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le cadre de la production de panneaux isolants. Les premiers tests ne considèrent qu'un seul type de granulats (chènevottes) et qu'un seul type de liant (paille de blé). Il s'agit de démontrer la faisabilité de tels composites et d'en qualifier les performances hygrothermique en regard des objectifs recherchés : réduire les besoins énergétique des bâtiments et satisfaire le confort hygrothermique des usagers.

2. Mise en œuvre et composition des matériaux développés

Cette étude cherche à produire un composite intégralement bio-sourcé en valorisant des ressources agricoles à la fois comme granulats et comme liant. Les premiers matériaux développés sont réalisés à base de granulats de chanvre (chènevottes) et de paille de blé qui assure le collage. Pour comparaison, des composites sont également réalisés avec un liant de type polysaccharides.

En effet, les chènevottes sont fréquemment utilisées comme granulat pour produire des composites avec des liants à base de chaux ou, plus récemment, avec des liants de type PLA ou amidon [AMZ 13] [COL 15] [TRA 10]. Les chènevottes utilisées dans cette étude sont des chènevottes commerciales de type Chanvribat (LCDA-France). Leur masse volumique est de l'ordre de 110 kg/m^3 . Leur granulométrie, mesurée par tamisage, est présentée sur la figure 1. La largeur moyenne des chènevottes (D50) est de 4 mm et le rapport largeur/longueur est de l'ordre de 4.

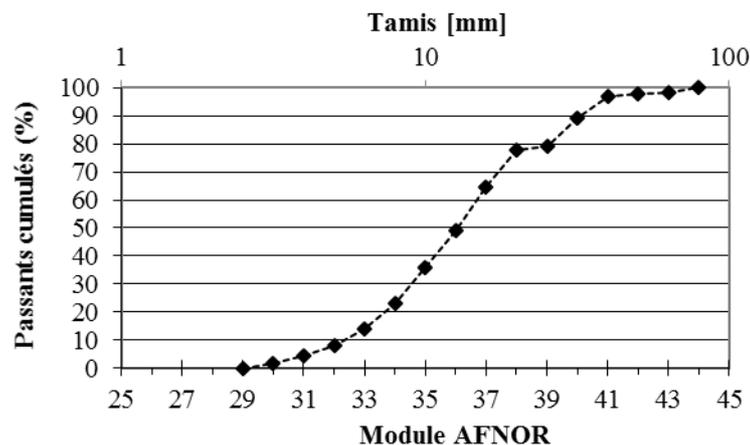


Figure 1. Granulométrie des chènevottes de type Chanvribat.

Au niveau du liant, la littérature indique que la lignine contenue dans la paille et dans d'autres herbacées agit avec l'hémicellulose comme un adhésif parfait pour la paille ou tout autre matériau cellulosique [GHA 14]. Ainsi, la paille de blé doit pouvoir être utilisée comme liant avec les chènevottes. Dans cette étude, plusieurs protocoles d'utilisation de la paille sont testés en prenant en compte différents ratios paille-chanvre et différentes phases d'activation thermique. En premier lieu, la paille est broyée finement puis mélangée avec les chènevottes. Le mélange est alors humidifié et chauffé tout en étant soumis à une contrainte de pression. Ces essais de faisabilité montrent que pour assurer une bonne cohésion, un minimum de 15% de paille de blé dans le mélange sec est nécessaire (figure 2).

L'effet collant de la paille de blé étant vérifié, des essais complémentaires sont menés en utilisant une infusion de paille à la place de la paille broyée. Les détails de ce protocole ne seront pas développés d'avantage pour raisons de confidentialité.

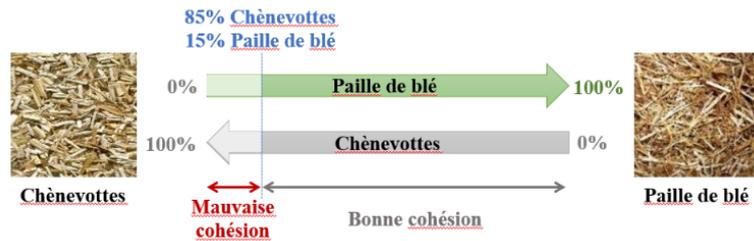


Figure 2. Evolution de la cohésion en fonction de la formulation des composites.

Après avoir optimisé la méthode de production, des échantillons sont fabriqués afin de tester leurs performances. Quatre type de composites sont produits : trois composites paille-chanvre et un composite polysaccharide-chanvre (tableau 1). Pour chaque formulation, trois échantillons de 10 cm de diamètre et de 7 cm de haut sont produits (figure 3). Les composites réalisés présentent une masse volumique faible, comprise entre 166 et 188 kg/m³ (tableau 2). Avec le même procédé de fabrication, le composite avec la plus forte teneur en chanvre présente la masse volumique la plus faible (B2 par rapport à B1).

Référence du composite	35	B1	B2	S2
Chènevottes	80 %	80 %	85 %	90.5 %
Paille de blé broyée	20 %			
Paille de blé infusée		20 %	15 %	
Polysaccharide				9.5

Tableau 1. Formulation des composites (en % du mélange sec).



Figure 3. Composites réalisés.

	35	B1	B2	S2
ρ_{moy} (kg/m ³)	179.8	187.9	165.9	181.6
σ_{ρ} (kg/m ³)	13.2	3.6	3.4	2.8
CV _{ρ} (%)	7.4	1.9	2.0	1.5

Tableau 2. Masse volumique des composites : valeur moyenne (ρ_{moy}), déviation standard (σ_{ρ}) et coefficient de variation (CV _{ρ}) .

3. Méthode de caractérisation thermique des composites

La caractérisation thermique est basée sur la mesure de la conductivité thermique après stabilisation à 23°C et 50% HR dans une armoire climatique. De manière à limiter la migration d'eau pendant l'essai, les mesures sont réalisées au moyen d'une méthode transitoire : la méthode du fil chaud. Cette méthode est basée sur l'évolution de la température en fonction du temps de chauffage.

$$\Delta T = \frac{q}{4.\pi.\lambda} (\ln(t) + C) \quad [1]$$

Où ΔT correspond à l'augmentation de température ($^{\circ}\text{C}$), q au flux de chaleur par mètre (W/m) et λ à la conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), t représente le temps de chauffe (s) et C est une constante incluant la diffusivité thermique du matériau.

Les mesures sont effectuées en insérant la sonde entre deux échantillons. Le flux de chaleur et le temps de chauffage sont choisis de manière à atteindre une élévation de température suffisante ($>10^{\circ}\text{C}$) et un bon coefficient de corrélation (R^2) entre les mesures et le modèle. Dans cette étude, un dispositif commercial est utilisé : le CT-mètre (figure 4). Il est équipé d'une sonde fil de 5 cm. Pour réaliser les mesures, la puissance sélectionnée est de 142 mW et le temps de chauffe de 120 s afin de respecter les conditions d'utilisation de l'appareil (élévation de température $>10^{\circ}\text{C}$ et coefficient de corrélation (R^2) proche de 1). Selon le fabricant, la précision de la mesure atteint alors 5%. Pour chaque formulation, trois échantillons sont produits ce qui permet de faire les mesures sur trois couples d'échantillons en combinant les différents échantillons entre eux (A&B, A&C et B&C). La conductivité thermique d'un couple est égale à la moyenne de trois mesures obtenues avec un coefficient de variation inférieur à 5%. La conductivité thermique du matériau est égale à la moyenne des valeurs obtenues pour les trois couples.

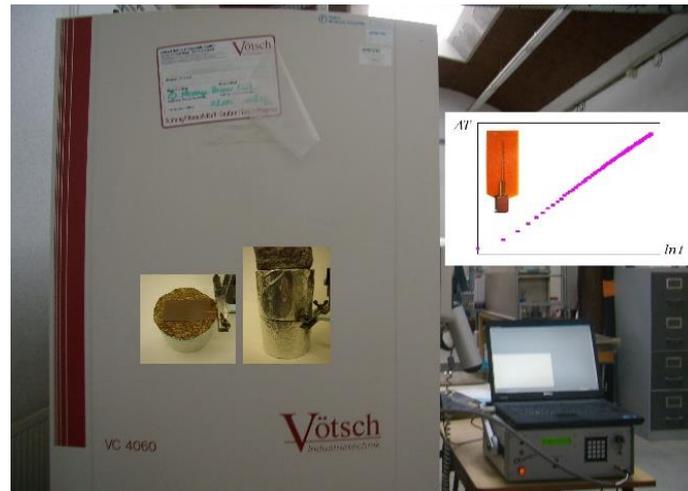


Figure 4. *Équipement de mesure de la conductivité thermique.*

4. Méthode de caractérisation hygrique des composites

La caractérisation hygrique des matériaux est basée sur la mesure de la valeur tampon hygrique (MBV) qui caractérise l'aptitude d'un matériau à modérer les variations d'humidité ambiante.

La valeur tampon hygrique est mesurée conformément au protocole décrit dans le Nordtest project [ROD 05]. Les échantillons sont étanchés 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 Vötsch (VC4060). La valeur tampon hygrique est alors calculée à partir des variations de masse durant le cycle selon

$$MBV = \frac{\Delta m}{A (HR_h - HR_b)} \quad [2]$$

Où MBV est la valeur tampon hygrique ($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\% \text{HR})$), Δm la prise/perte de masse (g), A la surface d'échange (m^2) 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 inférieure 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. La précision de lecture de la balance est de 0.01g et sa linéarité est de 0.01g. La précision de la valeur tampon hygrique est alors de 5%. Pour chaque formulation, la valeur tampon hygrique est mesurée pour trois échantillons puis moyennée.

5. Résultats et discussions

5.1. Caractérisation thermique

La figure 5 donne un exemple d'augmentation de température en fonction du logarithme népérien du temps de mesure lors d'une mesure au fil chaud. Le tableau 3 et la figure 6 donnent les valeurs moyennes, l'écart type et les coefficients de variation des mesures de conductivité effectuées sur les matériaux composites produits.

Pour tous les essais, les données expérimentales et le modèle de la sonde fil sont proches, ce qui se traduit par un coefficient de corrélation toujours supérieur à 0.9997. De plus, pour chaque type de composite étudié, les valeurs expérimentales de conductivité thermique obtenues pour l'ensemble des neuf mesures réalisées sur les trois couples d'échantillons sont très similaires et présentent alors un coefficient de variation inférieur à 3%. Cette bonne homogénéité des résultats permet de donner la valeur de la conductivité thermique avec une bonne confiance.

Les conductivités thermiques obtenues pour les composites développés, après stabilisation à 23°C, 50%HR, vont de 0.071 à 0.076 W/(m.K). La figure 6 montre que la conductivité thermique augmente avec la masse volumique. Quel que soit le type de composite (avec un liant de type paille de blé ou de type polysaccharide) la conductivité thermique suit la même tendance et ne semble pas impacté par le type de liant utilisé ni par le protocole de fabrication.

Les valeurs de conductivité thermique obtenues pour les composites paille-chanvre et polysaccharide-chanvre réalisés dans cette étude sont inférieures à celles généralement obtenues pour des composites chaux-chanvre. En effet pour des bétons de chanvre, Collet et Prétot [COL 14] ont trouvé des conductivités thermiques de 0.093 et 0.120 W/(m.K) à 23°C et 50%HR pour des masses volumiques respectivement égales à 260 et 390 kg/m³. De Bruijn et Johansson [BRU 13] ont étudié les conductivités thermiques de deux formulations de béton de chanvre à 15%HR et 65%HR. Les valeurs de conductivités trouvées à 65%HR sont de 0.116 et 0.10 W/(m.K) pour des masses volumiques respectivement égales à 394.8 et 298.1 kg/m³. Pour des composites réalisés à base de chanvre et de PLA, la conductivité thermique va de 0.085 à 260 kg/m³ à 0.120 W/(m.K) à 350 kg/m³ [COL 15]. Ces valeurs suivent la même tendance que les composites développés dans cette étude. Ces valeurs sont également proches de celles obtenues par Tran Le [TRA 10] pour des composites chanvre-amidon pour lesquels il donne une conductivité thermique de 0.062 W/(m.K) à l'état sec pour une masse volumique d'échantillon égale à 176 kg/m³.

On conclut donc de cette analyse que, pour les composites fabriqués, la masse volumique est le facteur le plus impactant sur la conductivité thermique des composites.

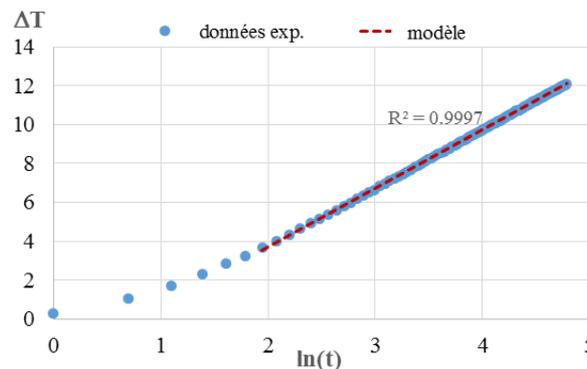


Figure 5. Evolution de la température en fonction du logarithme népérien du temps de chauffe.

	35	B1	B2	S2
λ_{av} (W/(m.K))	0.0747	0.0759	0.0714	0.0736
σ (W/(m.K))	0.0016	0.0019	0.0013	0.0020
CV (%)	2.09	2.56	1.82	2.70

Tableau 3. Masse volumique des composites : valeur moyenne (λ_{av}), écart-type (σ) et coefficient de variation (CV).

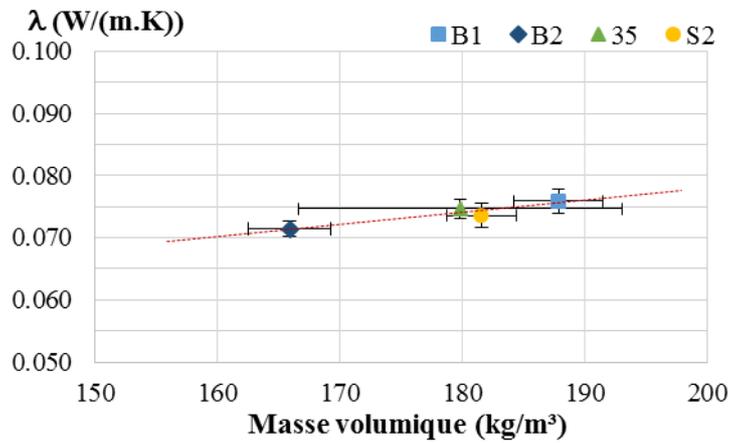


Figure 6. Conductivité thermique des composites (W/(m.K)) en fonction de la masse volumique

5.2. Caractérisation Hygrique

La figure 7 représente l'évolution de la température et de l'humidité relative à l'intérieur de l'enceinte climatique pendant l'essai. La valeur moyenne de l'humidité relative (HR) est légèrement en dessous de 75%HR pendant la phase d'adsorption (environ 72.9 %HR) et légèrement supérieure à 33%HR en phase de désorption (environ 33.3 %HR) à cause des perturbations engendrées par l'ouverture de la porte, régulièrement ouverte pour réaliser les pesées des échantillons (visibles au niveau des pics sur la courbe).

La figure 8 montre un exemple de prise et perte de masse durant un essai pour un échantillon (S2-A). Pour tous les échantillons, les écarts entre les variations de masse au cours des cycles sont inférieurs à 5% pour les cycles 3 à 5. Les valeurs de tampon hydrique sont donc calculées à partir des valeurs obtenues sur les cycles 3 à 5.

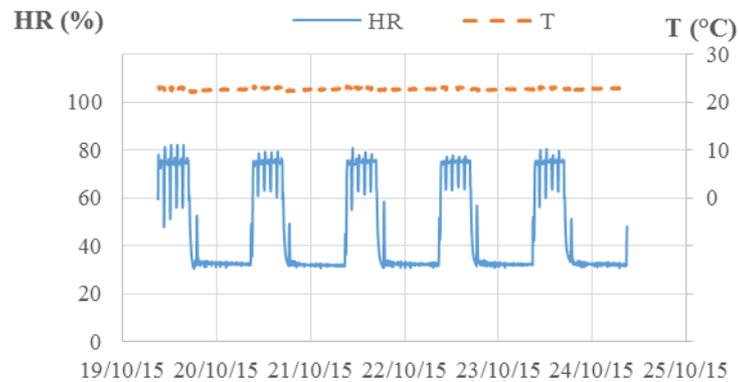


Figure 7. Suivi de la température (T) et de l'humidité relative (HR) durant l'essai de mesure de valeur tampon hygrique (MBV)

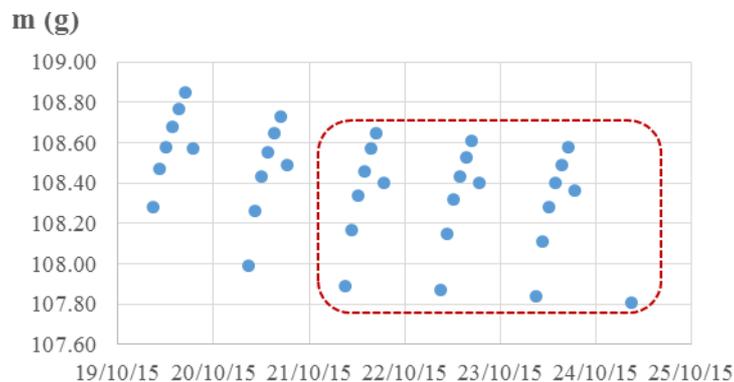


Figure 8. Exemple de prise et perte de masse d'un échantillon (S2-A) durant l'essai

Le tableau 4 et la figure 9 résument les valeurs tampon hydriques obtenues en absorption, en désorption et en moyenne pour les quatre types de composites. L'écart type est très faible entre mesures et conduit à un coefficient de variation inférieur à 2 % (et généralement inférieur à 1%).

La valeur tampon hygrique moyenne varie entre 2.20 et 2.42 g/(m².%HR). Selon la classification du Nordtest project [ROD 05] tous ces composites sont donc d'excellents régulateurs hygriques avec un MBV > 2 g/(m².%HR). La figure 9 montre que la valeur tampon hygrique n'est pas impactée par la masse volumique des échantillons réalisés. Les trois composites réalisés à partir de chanvre et de paille de blé ont des MBV similaires alors que les composites fabriqués à partir de chanvre et de polysaccharides présentent une valeur MBV légèrement meilleure. Le type de liant influe donc légèrement sur les performances hygriques des composites.

Les résultats obtenus pour les composites étudiés sont de l'ordre des 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][COL 15]. Les valeurs sont meilleures que celles obtenues pour des composites à base de PLA pour lesquels la valeur tampon hygrique est de 1.77 g/(m².%HR) [COL 15].

	35	B1	B2	S2
MBV abs (g/(m ² .%RH))	2.23 ± 0.02	2.17 ± 0.03	2.21 ± 0.02	2.36 ± 0.01
MBV des (g/(m ² .%RH))	2.30 ± 0.02	2.23 ± 0.02	2.24 ± 0.01	2.47 ± 0.01
MBV moy. (g/(m ² .%RH))	2.27 ± 0.02	2.20 ± 0.03	2.22 ± 0.02	2.42 ± 0.01

Tableau 4. Valeur tampon hygrique des composites en absorption (abs), désorption (des) et moyen (moy) et déviation standard..

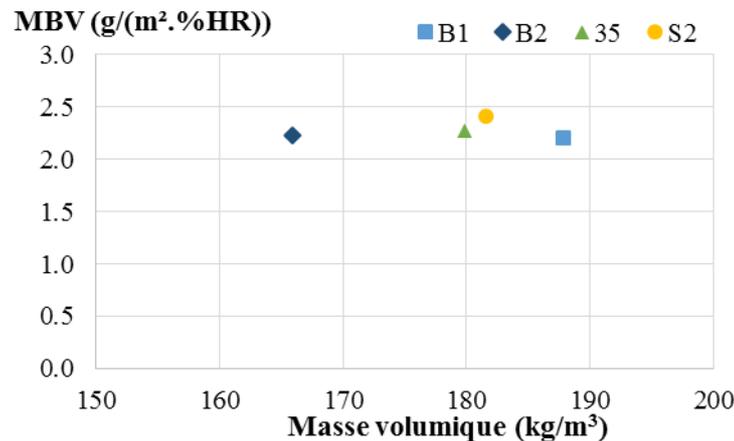


Figure 9. Valeur tampon hygrique moyenne des composites (g/(m².%HR)) en fonction de la masse volumique

6. Conclusion

Cette étude montre que la paille de blé s'avère être un liant bien adapté aux granulats de chanvre pour produire des composites intégralement bio-sourcés. Pour assurer une bonne cohésion des composites, on montre que la formulation du mélange sec doit contenir au moins 15% de paille (et 85% de chènevottes). La masse volumique des matériaux développés est comprise entre 165 et 190 kg/m³. Les propriétés thermiques des composites obtenus sont intéressantes et la conductivité thermique mesurée est faible (comprise entre 0.071 et 0.076 W/(m.K)). De plus, la valeur tampon hygrique des composites testés est supérieure à 2 g/(m².%HR) ce qui les classe comme excellents régulateurs hygriques. Afin de conserver au mieux cette qualité, le parement mis en place côté intérieur doit être suffisamment perméable.

Les résultats obtenus sont encourageants pour poursuivre le développement de ces composites bio-sourcés afin de satisfaire les objectifs du projet ISOBIO qui prévoit la mise au point de matériaux à faible impacts environnementaux, qui présentent de bonnes performances hygrothermiques et qui permettent de réduire la consommation énergétique des bâtiments tout en assurant un bon confort hygrothermique des usagers.

Ces matériaux étant hygroscopiques, la mesure de l'évolution de la conductivité thermique avec la teneur en eau viendra compléter cette étude. La caractérisation mécanique de ces composites doit également permettre de valider la pertinence de cette solution.

7. Remerciements

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

8. 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.
- [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, DOI information: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.
- [COL 15] COLLET F., PRÉTOT S., MAZHOUD B., BESSETTE L., LANOS C., Comparing hemp composites made with mineral or organic binder on thermal, hygric and mechanical point of view, *First International Conference on Bio-based Building Materials, ICBBM 2015*, Clermont Ferrand, 21-24 juin 2015, e-ISBN PRO99 : 978-2-35158-154-4.
- [GHA 14] GHAFAR S. H., FAN M., Lignin in straw and its applications as an adhesive, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 48, 92-101, 2014.
- [ROD 05] RODE, C.; Moisture buffering of Building Materials, Report BYG•DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195, 2005.
- [TRA 10] TRAN LE A.D., Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (in french), PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, November 2010.