

---

# Elaboration et caractérisation thermique et hygrique de composite bio-sourcé à base d'argile

Mazhoud Brahim<sup>1</sup>, Collet Florence<sup>2</sup>, Pretot sylvie<sup>3</sup>, Lanos Christophe<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, INSA Rennes [brahim.mazhoud@univ-rennes1.fr](mailto:brahim.mazhoud@univ-rennes1.fr)

<sup>2</sup>LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1 [florence.collet@univ-rennes1.fr](mailto:florence.collet@univ-rennes1.fr)

<sup>3</sup>LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1 [sylvie.pretot@univ-rennes1.fr](mailto:sylvie.pretot@univ-rennes1.fr)

<sup>4</sup>LGCM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1 [christophe.lanos@univ-rennes1.fr](mailto:christophe.lanos@univ-rennes1.fr)

---

**RÉSUMÉ.** Cette étude s'intéresse à l'utilisation d'argile comme liant pour élaborer des composites chanvre-argile. L'argile est issue de boues de lavage d'un site de production de graviers. Deux températures de séchage des boues sont considérées. Les performances thermiques et hygriques des argiles et des composites chanvre-argile sont mesurées et comparées à celles de bétons de chanvre. La caractérisation thermique est basée sur la mesure de conductivité thermique à 23°C-50%HR. La caractérisation hygrique est basée sur la mesure de la valeur tampon hygrique à 23°C. Les résultats montrent que la température de séchage des boues n'impacte pas notablement les propriétés thermiques et hygriques de l'argile seule. Les performances thermiques et hygriques des composites argile-chanvre sont semblables à celles de béton de chanvre ayant la même densité. Ces matériaux se classent comme excellents régulateurs hygriques. Les performances mesurées séparément sur le chanvre et l'argile révèlent un effet synergique intéressant dans le cas du composite argile-chanvre qui donne une plus haute valeur tampon hygrique.

**ABSTRACT.** This study investigates the use of clay as binder to produce hemp composites. The clay is produced from washing mud from gravels production site. Two mud drying temperatures are used. Thermal and hygric performances of clays and hemp-clay composites are measured and compared to hemp-lime ones. The thermal characterisation is based on the measurement of thermal conductivity at 23°C, 50%RH. The hygric characterization is based on the measurement of Moisture Buffer Value at 23°C. The results show that the mud drying temperatures do not significantly impact thermal and hygric properties of clays. Thermal and hygric performances of hemp-clay are close to the ones of hemp-lime with similar density. These materials act as excellent hygric regulators. Performances separately measured on hemp and on clay underline an interesting synergetic effect in the case of hemp-clay composite leading to a higher ability in moisture buffering.

**MOTS-CLÉS :** Argile, chanvre, conductivité thermique, valeur tampon hygrique.

**KEY WORDS:** Clay, hemp, thermal conductivity, moisture buffer value.

---

## 1. Introduction

Les matériaux bio-sourcés sont utilisés en alternative des matériaux traditionnels afin de réduire les impacts de bâtiments sur l'environnement. En effet, ces matériaux sont constitués de matières premières renouvelables et constituent un puit de carbone [AMZ 13]. Parmi ceux-ci, le béton de chanvre, composé généralement de chènevottes et de liant à base de chaux, a fait l'objet de nombreuses études [AMZ 13] [BOU 05] [CER 05] [COL 12] [COL 13] [COL 14] [LAU 12] [PRE 14] [TRA 10]. L'analyse de cycle de vie de bétons de chanvre révèle que, pour une composition de type mur, le constituant le plus impactant est le liant [PRE 14].

Cette étude a pour but de remplacer le liant habituellement utilisé (chaux) par un liant à base d'argile pour réduire l'impact de béton de chanvre sur l'environnement. En effet, l'impact de l'argile sur l'environnement est très faible : la ressource est disponible en grande quantité et est recyclable. De plus, l'énergie exigée pour extraire, transformer et produire la matière est faible. D'autre part, ce matériau peut présenter un intérêt d'un point de vue hygrique, en raison de sa capacité de réguler l'humidité relative ambiante [CAG 14]. D'un point de vue thermique, l'argile n'est pas un bon isolant. Le couplage avec le chanvre a pour objectif de réduire la conductivité thermique du composite.

La formulation du composite argile-chanvre est basée sur une densité cible, égale à celle du béton de chanvre pour l'application mur. L'analyse des performances thermiques et hygriques est basée sur la comparaison entre les résultats expérimentaux du chanvre en vrac, de l'argile et des composites argile-chanvre. Les performances des composites chanvre-argile sont également comparées à celles de béton de chanvre.

## 2. Matériaux

### 2.1 Chanvre

Le chanvre utilisé est un produit commercial Chanvribat (LCDA France). Sa densité est de l'ordre de 110 kg/m<sup>3</sup>. L'étude granulométrique des chènevottes est réalisée par tamisage mécanique en utilisant des tamis standards à maille carrée (figure 1). Le diamètre moyen (D50) est de 4 mm et le rapport longueur sur largeur est d'environ 4.

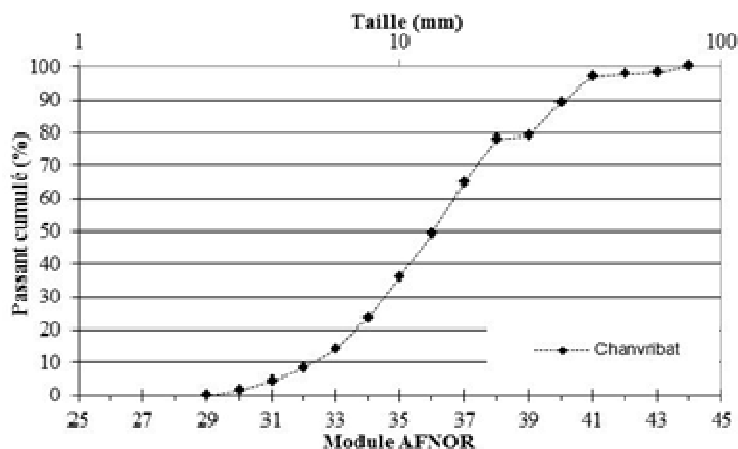


Figure 1. Distribution granulométrique de chènevotte.

### 2.2 Liant

L'argile retenue dans le cadre de cette étude correspond à une boue de lavage prélevée sur un site de production de graviers. Après décantation, la boue est séchée en étuve. Deux températures de séchage sont considérées : 100°C et 40 °C. En effet, une température de séchage plus élevée permet un séchage plus rapide. Après séchage, le matériau est broyé avec un broyeur à couteaux. Le matériau est ensuite tamisé, au tamis de 0,2 mm, afin d'éliminer les grosses particules.

### 2.3 Formulations et fabrication

Afin de vérifier si la température de séchage a des impacts sur les propriétés thermiques et hygriques de l'argile, des échantillons sont produits avec de la boue séchée à 40°C (A40) et d'autres avec de la boue séchée à 100°C (A100). L'argile est mélangée avec l'eau avec un rapport eau/argile égal à 0.4. Le mélange est réalisé à l'aide d'un malaxeur (type Hobart). Les échantillons sont moulés et pilonnés en deux couches. Après stabilisation à 23°C, 50%HR, la densité des deux formulations d'argile est pratiquement similaire (1680 kg/m<sup>3</sup>).

Le composite argile-chanvre (AC) est élaboré avec la boue séchée à 100°C en la couplant avec la chènevotte chanvribat (LCDA France). Le rapport chanvre/argile est estimé en se référant aux mélanges traditionnels de béton de chanvre utilisés pour les applications murs, soit autour de 400 kg/m<sup>3</sup>. Le composite est produit par moulage. Les chènevottes et l'argile sont mélangés avec un rapport chanvre/argile égal à 0.75. La quantité d'eau est ajustée afin d'obtenir une consistance satisfaisante pour la réalisation du mélange et du moulage. Le rapport eau/liant est égal à 0.7. Le moulage est réalisé par pilonnage en deux couches. La densité des composites argile-chanvre est de l'ordre de 385 kg/m<sup>3</sup>.

Le béton de chanvre (BC) est fabriqué avec la chaux Tradical BCB PF70. Le rapport chanvre/liant est égal à 0.5 et les échantillons sont produits par projection.

Les composants de chaque formulation sont donnés dans le Tableau 1.

Pour les études thermiques et hygriques, les échantillons sont choisis pour être représentatifs des matériaux (la densité et l'homogénéité). Les tailles et la densité des échantillons sont données dans le Tableau 1.

**Tableau 1.** Composition des formulations étudiées et masse volumique des échantillons à (23°C, 50%HR).

| Ref  | Liant                   | Chanvre    | Rapport Chanvre/Liant | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensions (cm×cm×cm) |
|------|-------------------------|------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| A40  | Argile (séchée à 40°C)  | -          | -                     | 1684±7                               | 10x10x5               |
| A100 | Argile (séchée à 100°C) | -          | -                     | 1675±5                               | 10x10x5               |
| AC   | Argile (séchée à 100°C) | Chanvribat | 0.75                  | 385±2                                | 10x10x7               |

## 3. Méthodes

### 3.1 Caractérisation thermique

La caractérisation thermique se base sur la mesure de conductivité thermique à 23°C, 50% HR. Pour limiter les problèmes de migration d'eau, les mesures sont réalisées en régime transitoire avec une sonde fil de 5 cm. La mesure est basée sur l'analyse de l'élévation de température en fonction de temps de chauffage. 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 (R<sup>2</sup>) élevé.

Pour l'argile, le composite argile-chanvre et le béton de chanvre, la sonde fil est placée entre deux échantillons plans. Le temps de chauffage utilisé est de 120 secondes pour toutes les formulations et la puissance est de 0.142 W pour les deux argiles et de 0.689 W pour le composite argile-chanvre. Afin de satisfaire les hypothèses du modèle de la sonde fil, on s'assure que les dimensions des échantillons sont plus grandes que le volume sondé [COL 14]. Pour chaque formule, trois couples sont formés avec trois échantillons. La conductivité thermique d'un couple est la moyenne de cinq mesures avec un coefficient de variation inférieur à 5%. La conductivité thermique d'une formulation est égale à la moyenne des mesures obtenues sur les trois couples.

Pour le chanvre en vrac, les échantillons sont réalisés dans deux containers permettant de vérifier que leur masse volumique soit représentative du chanvre en vrac (Figure 2). La puissance utilisée est de 0.159 W et le temps de chauffage est de 60 s.



**Figure 2.** *Mesure de conductivité thermique de chanvre en vrac avec le CT-mètre.*

### 3.2 Caractérisation hygrique

La caractérisation hygrique se base sur la mesure de valeur tampon hygrique MBV des matériaux qui caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité de l'air avoisinant. La mesure a été faite selon la méthode définie dans le Nordtest Project [ROD 05]. Après stabilisation à 23°C, 50%HR, les échantillons sont exposés à des cycles d'humidités relatives journaliers : 8 heures à haute humidité relative (75%) suivis de 16 heures à basse humidité relative (33%). Les cycles sont répétés jusqu'à ce que l'écart entre les variations de masse mesurées pour les cycles soit inférieur à 5% sur les trois derniers cycles.

La valeur tampon hygrique est calculée selon l'équation [1].

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})} \quad [1]$$

Où :

MBV est la valeur tampon hygrique (g/ (m<sup>2</sup>.%HR)),

$\Delta m$  est variation de masse durant la phase d'adsorption ou désorption (g),

A est la surface d'échange (m<sup>2</sup>),

HR<sub>haute</sub>/ HR<sub>basse</sub> sont les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%).

La méthode de test recommande des échantillons prismatiques scellés sur cinq des six côtés, avec une surface d'échange supérieure à 100 cm<sup>2</sup> pour chaque échantillon et une surface totale d'échange supérieure à 300 cm<sup>2</sup> par formulation.

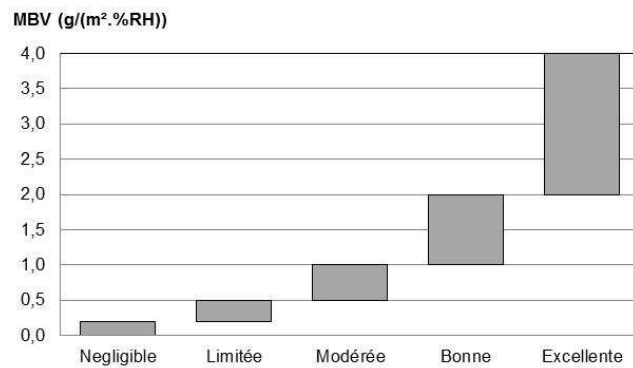
Pour chaque échantillon, la valeur MBV est la moyenne des valeurs calculées sur les trois derniers cycles. Pour chaque formulation, la valeur MBV est la moyenne des valeurs obtenues sur trois échantillons.

Ce protocole a été testé lors d'un Round Robin test impliquant plusieurs laboratoires européens, sur différents matériaux de Génie civil : béton, brique, béton cellulaire, plâtre, bois... Une classification des matériaux a été alors proposée (figure 3).

Le banc d'essai utilisé est constitué d'une armoire climatique Vötsch VC4060 au sein de laquelle la température peut être réglée entre 10 et 95°C et l'humidité relative entre 10 et 98%. La consigne est changée manuellement au cours de l'essai selon le schéma 8/16 heures à 75/33% HR. L'ambiance est enregistrée en continu avec des sondes sensirion SHT 75. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont inférieures à 0,14 m/s alors que les composantes horizontales sont de 0,1 à 0,4 m/s.

Le suivi massique des échantillons s'appuie sur 5 pesées durant les phases d'absorption et 2 pesées durant les phases de désorption. La précision de la balance est de 0,01 g, et sa linéarité est de 0,01 g. L'exactitude de la valeur MBV est donc d'environ 5%.

Pour le chanvre en vrac, les chènevottes sont placées dans des containers. La surface d'échange est de 116 cm<sup>2</sup> pour chaque échantillon. La hauteur des échantillons est de l'ordre de 11 cm pour être supérieure à la hauteur de pénétration. La masse volumique de chanvre en vrac est vérifiée pour être représentative.



**Figure 3.** Classification des valeurs tampon hygrique (MBV) selon le Nordtest Project [ROD 2005].

#### 4. Résultats et discussion

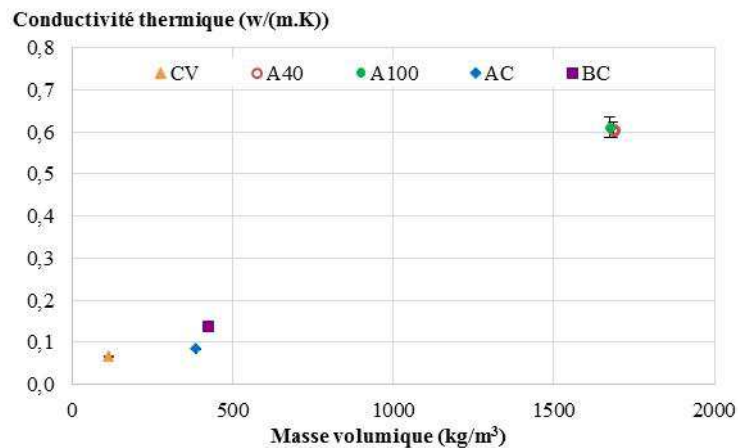
##### 4.1 Caractérisation thermique

Les mesures de conductivité réalisées à la sonde fil présentent chacune un coefficient de corrélation supérieur à 0,99. De plus, les coefficients de variation sont inférieurs à 4% pour chaque matériau.

La figure 4 présente la conductivité thermique à 23°C, 50%HR en fonction de la masse volumique. La conductivité thermique augmente avec la densité. Le chanvre en vrac (CV) a la plus faible conductivité thermique (0.067 W/(m.K)) en raison de sa faible densité (113 kg/m<sup>3</sup>) et de sa forte porosité.

L'argile présente les valeurs les plus hautes de conductivité thermique, en cohérence avec le fait que sa densité est la plus élevée. La température de séchage n'impacte pas la conductivité thermique de l'argile. En effet, l'argile obtenue par séchage à 40 °C a une conductivité thermique semblable à celle séchée à 100°C (0.605 W/(m.K) à 1684 kg/m<sup>3</sup> pour A40 et 0.612 W/(m.K) à 1673 kg/m<sup>3</sup> pour A100).

Le composite argile-chanvre (AC) présente une conductivité thermique plus faible que le béton de chanvre (BC) [COL 14] (respectivement 0.085 W / (m. K) à 385 kg/m<sup>3</sup> et 0.139 W / (m. K) à 422 kg/m<sup>3</sup>). La conductivité thermique est donc aussi légèrement impactée par le type du liant.



**Figure 4.** Conductivité thermique des différentes formulations en fonction de la masse volumique à (23°C, 50% HR).

Comparé avec d'autres matériaux de construction bio-sourcés, le composite argile-chanvre étudié et le béton de chanvre présentent une conductivité thermique plus basse que la conductivité thermique obtenue par la relation [2] établie par Cerezo pour le béton de chanvre [CER 05].

Finalement, le composite argile-chanvre étudié a une conductivité thermique semblable que le composite paille-argile étudié par Labat ( $\lambda = 0.088 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\rho = 381 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) [LAB 16].

## 4.2 Caractérisation hygrique

La figure 5 présente l'humidité relative dans l'armoire climatique lors de l'essai. Au cours de l'essai, la valeur moyenne d'humidité relative est légèrement inférieure à 75% durant les phases d'absorption (environ 74.13%) et légèrement supérieure à 33 % durant les phases de désorption (environ 35.2%). Ceci est dû à l'ouverture régulière de la porte lors des pesées. D'autre part, lors des changements de consignes, le passage de 33 à 75% s'effectue en environ trente minutes, alors qu'il faut presque une heure pour passer de 75 à 33%. Il a été prouvé que la durée de montée/descente en humidité relative avait un effet limité sur la valeur de capacité tampon hygrique (inférieur à 5%) même lorsque cette durée atteignait une heure et demi [ROE 05].

La figure 5 présente également un exemple de cinétique de prise/perde de masse d'un échantillon durant l'essai MBV. Pour chaque formule, les mesures réalisées sur trois échantillons donnent des résultats semblables pour la cinétique de prise/perde de masse et ainsi que pour la valeur tampon hygrique.

La figure 6 donne la valeur moyenne de la valeur tampon hygrique calculée sur les cycles 3 à 5 en adsorption, en désorption et en moyenne pour tous les matériaux. La valeur est légèrement plus haute en désorption qu'en adsorption. En effet, après stabilisation à 23°C; 50%HR, la première phase d'adsorption est réalisée en partant de 50 %HR, alors que les cycles suivants sont réalisés entre 33 et 75 %HR. Le faisceau des cinétiques de masse présente donc une tendance décroissante (figure 5) qui se traduit par une valeur MBV plus élevée en désorption qu'en adsorption. Après plusieurs cycles, la cinétique et les valeurs MBV tendent à se stabiliser, la valeur en désorption tend alors vers la valeur en adsorption.

Selon la classification de NORDTEST project, tous les matériaux étudiés sont classés excellents régulateurs hygrique ( $\text{MBV} > 2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ). La Valeur tampon hygrique du chanvre en vrac est  $2.30 \pm 0.03 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ , celle de l'argile est  $2.06 \pm 0.04 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$  pour A40 et  $2.08 \pm 0.03 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$  pour A100. Les températures de séchage testées n'ont pas d'impact sur la valeur tampon hygrique de l'argile. Le composite argile-chanvre présente une valeur de MBV plus haute que le chanvre en vrac et que l'argile ( $2.68 \pm 0.11 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ). Ceci souligne l'effet de couplage des deux composants. La figure 7 montre que le MBV n'est pas lié à la densité. Cette valeur est liée à la fois au transfert d'humidité et la capacité de stockage du matériau. Il dépend ainsi de la porosité du matériau et de la connectivité dans la structure poreuse.

Le composite argile-chanvre est meilleur régulateur hygrique que le béton de chanvre pour lequel la valeur tampon hygrique MBV est de 1.94 à 2.15  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$  selon la formulation [COL 13], 1.99 et 2.35  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$  selon [TRA 10] (respectivement valeur expérimentale et valeur analytique) et 2.02  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$  selon [RAH 15].

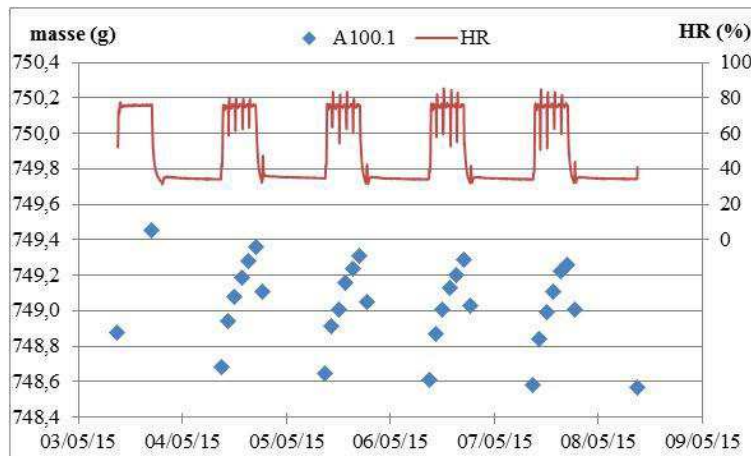
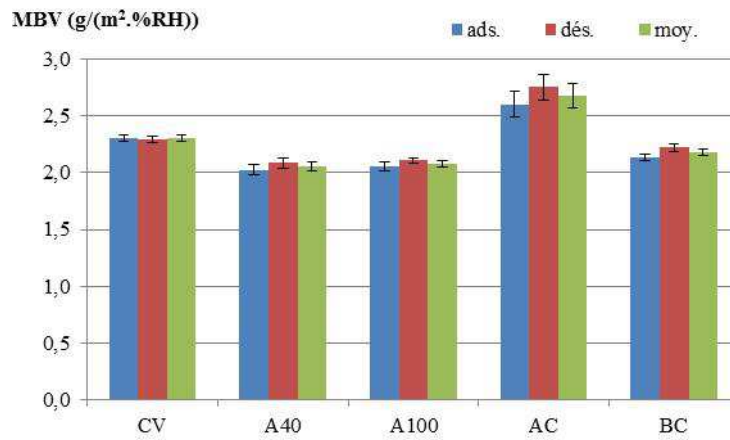
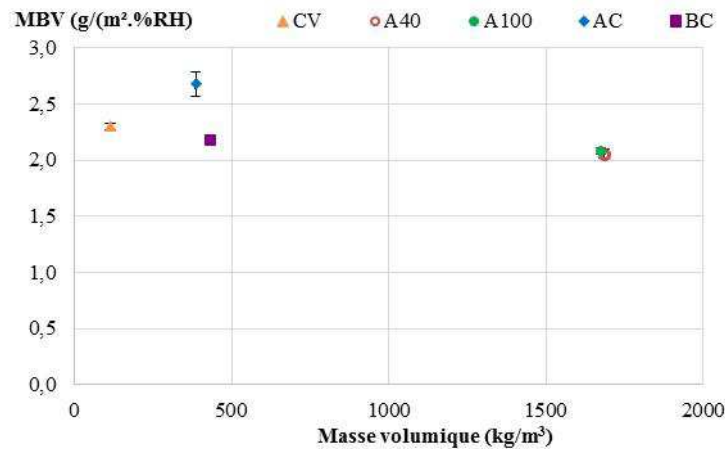


Figure 5. Ambiance d'humidité relative lors de l'essai et exemple de cinétique de prise/perde de masse d'un échantillon.



**Figure 6.** Valeurs tampon hygrique (MBV) des différentes formulations en phase d'absorption, de désorption et valeur moyenne à 23°C



**Figure 7.** Valeur tampon hygrique MBV des matériaux en fonction de la masse volumique (23°C ;50% HR).

## 5. Conclusion

Cette étude montre la faisabilité de composites argile-chanvre et compare leurs performances à celles de béton de chanvre.

L'argile utilisée est issue de boues de lavages. Les résultats montrent que les températures de séchage n'impactent pas les propriétés thermiques et hygriques de l'argile. Ainsi, la température de séchage retenue est de 100°C, permettant un séchage plus rapide des boues.

La formulation du composite argile-chanvre est ajustée afin d'obtenir une masse volumique semblable à celle de béton de chanvre utilisé pour l'application mur.

La conductivité thermique mesurée sur le chanvre en vrac, l'argile et le composite argile-chanvre montre qu'elle dépend principalement de la densité. La comparaison du composite argile chanvre au béton de chanvre montre également un léger effet du type de liant. Ces matériaux étant hygroscopique, l'effet de la teneur en eau sur la conductivité thermique des composites argile chanvre viendra compléter cette étude.

Le composite argile-chanvre est un excellent régulateur hygrique. Sa valeur tampon hygrique est plus haute que celle du béton de chanvre. Les résultats soulignent un effet de synergie entre le chanvre et l'argile. Dans le but de maintenir cet excellent comportement, l'enduit utilisé pour recouvrir ce composite doit être suffisamment perméable pour permettre de conserver au mieux la valeur de MBV.

Enfin, cette étude sera complétée par l'analyse du comportement mécanique sachant que des performances minimales sont requises. En effet, afin de promouvoir ce nouveau type de matériau de construction bio-sourcé, il est nécessaire de connaître l'ensemble de ces caractéristiques.

## 6. Bibliographie

- [AMZ 13] Amziane, S., Arnaud, L., Bio-aggregate-based Building Materials, Applications to Hemp Concrete, *ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc* 2013.
- [BOU 05] Boutin M.P., et al., Analyse du cycle de vie de: Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois, 2005, INRA Lille.
- [CAG 14] Cagnon H., et al., Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy and Buildings*, Vol. 80, 2014, pp. 208–217.
- [CER 05] Cerezo V., Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.2005.
- [COL 12] Collet F., Pretot, S., Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 2012, pp. 58–65.
- [COL 13] Collet F., et al., Comparison of the hygric behaviour of three hemp concrete. *Energy and Building*, Vol. 62, 2013, pp. 294–303.
- [COL 14] Collet F., Pretot, S., Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials*, Vol. 65, 2014, pp. 612–619.
- [EVR 06] Evrard A., Sorption behaviour of Lime-hemp concrete and its relation to indoor comfort and energy demand, *in: 23rd Conference on passive and low energy architecture*, Geneva 2006, Switzerland; pp.6–8.
- [LAB 16] Labat, M., et al., From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential, *Building and Environment*, Vol. 97, 2016, pp. 69–81.
- [LAU 12] Laurent A., Etienne G., Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 28, 2012, pp. 50–56.
- [ROD 05] Rode C., Moisture buffering of Building Materials, Report BYG-DTU R-126, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195, 2005.
- [ROE 05] Roels S., Janssen, H., 2005, Is the moisture buffer value a reliable material property to characterize the hygric buffering capacities of building materials? *Working paper A41-T2-B-05-7 for IEA Annex 41 project, Whole Building Heat, Air and Moisture Response*, Trondheim, 2005.
- [RAH 15] Rahim M., et al., Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Building*, Vol. 88, 2015, pp. 91–99.
- [PRE 14] Pretot S., et al., Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating, *Building and Environment*, Vol. 72, 2014, pp. 223–231
- [TRA 10] Tran Le A.D., et al., Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Buildings*, Vol. 42, 2010, pp. 1797–1806.
- [TRA 10] Tran Le A.D., Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, PhD thesis, Université de Reims Champagne- Ardenne, 2010.