

# Elaboration et caractérisation mécanique, thermique et hygrique de composites bio-sourcés à base d'argile

Brahim MAZHOUD<sup>1</sup>

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

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

*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. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques des composites, l'argile est stabilisée par des liants commerciaux. Les composites sont élaborés avec différents rapports chanvre sur liant. Le rapport chanvre sur liant est estimé en se référant aux mélanges traditionnels de béton de chanvre utilisés pour les applications dalle, mur et toit. Les performances mécaniques, thermiques et hygriques sont mesurées. La caractérisation mécanique se base sur la mesure de la résistance en compression, de la résistance en traction par fendage et du module élastique. La caractérisation thermique est basée sur la mesure de conductivité thermique à 23°C-50%RH. La caractérisation hygrique est basée sur la mesure de la valeur tampon hygrique à 23°C. Les résultats montrent que les performances mécaniques, thermiques et hygriques des composites sont semblables à celles de béton de chanvre ayant la même densité. Les propriétés mesurées sont intéressantes : leur conductivité thermique est faible (0.102 à 0.129 W/(m.K)) et les matériaux s'avèrent être d'excellents régulateurs hygriques (MBV > 2 W/(m².%RH)).*

....

*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. In order to improve the mechanical properties of the composites, the binder is stabilized by commercial binders. The composites were produced with several Hemp/Binder ratios. The hemp to Binder ratio is estimated regarding traditional mix proportioning of hemp concrete used for floor, wall and roof. Mechanical, thermal and hygric performances of composites are measured. The mechanical characterization is based on the measurement of compressive strength, tensile strength by splitting, apparent and elastic modulus. The thermal characterization 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 mechanical, thermal and hygric performances of composites are close to the ones of hemp-lime with similar density. The composites show interesting mechanical, thermal and hygric properties as they have low thermal conductivity (0.102 to 0.129 W/(m.K)) and they are excellent hygric regulators (MBV > 2 W/(m².%RH)).*

*MOTS-CLÉS : Chanvre ; Argile ; Propriétés mécaniques; Conductivité thermique, Valeur tampon hygrique.*

*KEY WORDS: Hemp; Clay; Mechanical properties; 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 du 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 à 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. Les formulations des composites sont basées sur la variation du rapport chanvre/liant. La caractérisation mécanique est basée sur la mesure de la résistance en compression, de la résistance en traction et du module élastique. La caractérisation thermique repose sur la mesure de la conductivité thermique après

stabilisation à 23°C, 50% HR. La stabilisation lombrydienne est réalisée en 145/150 (15 jours) à travers la mesure de la valeur tampon hydrique (MBV - moisture buffer value). L'analyse de ces performances est basée sur la comparaison entre les résultats expérimentaux des composites développés à celles de béton de chanvre.

## 2. Matériaux

### 2.1. Chanvre

Le chanvre utilisé dans cette étude est un produit commercial de type biofibat (CAVAC-France). Sa masse volumique en vrac est de l'ordre de 106 kg/m<sup>3</sup>. L'étude granulométrique des chènevottes est réalisée par tamisage mécanique en utilisant des tamis standards à maille carrée et par traitement d'image (figure 1). La largeur moyenne (150) est de 2,9 mm et l'élongation (rapport longueur sur largeur) est d'environ 4.

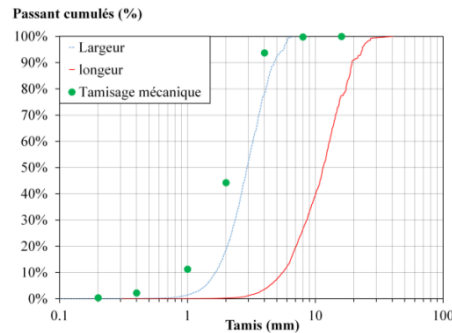
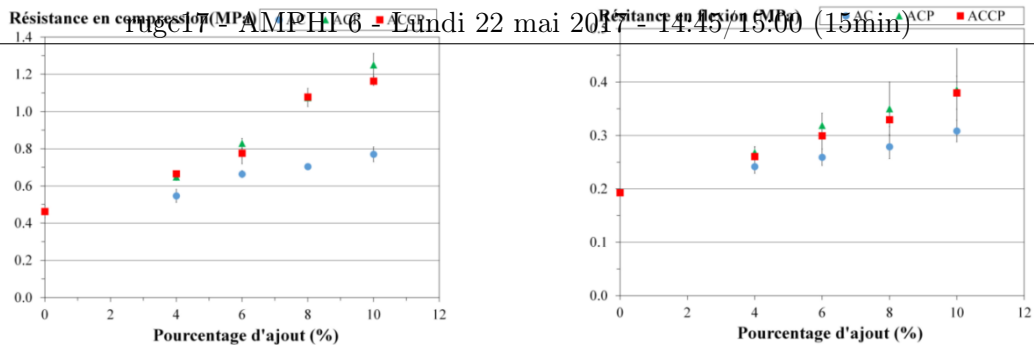


Figure 1. Granulométrie des chènevottes de type biofibat.

### 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 à 100°C. 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. Afin de stabiliser l'argile et d'améliorer ses propriétés mécaniques, différents liants commerciaux sont utilisés: liant à base de chaux (Thermo®) de BCB, Ciment Portland (CEM I 52,5 N CE CP2 NF) de Lafarge (Saint Pierre la cour) et un mélange à part égale de ces deux liants. Différents dosages de stabilisation sont considérés (4, 6, 8 et 10% d'ajout) de liant par rapport à la masse d'argile. Les échantillons ont été préparés selon la méthode de test du ciment EN 196-1 [NF 06] avec un rapport eau sur liant de 0,4, suffisant pour garantir l'aptitude à l'écoulement à l'image de celle d'un liant à base de chaux traditionnellement utilisé pour le béton de chanvre. Le mélange est ensuite placé dans des moules 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> et stocké dans une pièce à 23 ° C et à 50% HR pendant 2 jours. Les échantillons sont ensuite démoulés et durcis dans les mêmes conditions jusqu'à l'évaluation des propriétés mécaniques. Pour identifier les propriétés mécaniques, l'essai de flexion trois points a été effectué sur trois échantillons prismatiques de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm. Des essais de compression ont été effectués sur les échantillons préalablement brisés en flexion. Les propriétés mécaniques ont été déterminées selon la méthode de test du ciment conformément à la norme EN 196-1 [NF 06]. L'effet de la variation du type et de la teneur en stabilisant sur la densité et les propriétés mécaniques de différentes formulations est étudié. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau 1. Les valeurs de résistance en compression de différentes formulations sont représentées sur la figure 2 et le tableau 1. Pour chaque formulation, la résistance en compression est la moyenne de six valeurs. On peut voir que, quel que soit le type de stabilisant, la résistance en compression augmente avec la teneur de stabilisant. Ce phénomène est dû à la réaction des composés cimentaires. Les valeurs de résistance en traction par flexion sont indiquées sur la figure 3 et le tableau 1. Pour chaque formulation, la résistance en traction par flexion est la moyenne de trois valeurs. Les résultats montrent que quel que soit le type de stabilisant, la résistance en compression et la résistance en traction par flexion augmente avec la teneur de stabilisant. Cette augmentation est moins importante avec l'ajout de chaux seule qu'avec l'ajout de ciment ou le couple ciment-chaux. Les résultats montrent que l'on atteint des niveaux de résistance intéressants pour l'argile stabilisée avec 10% de ciment Portland et pour l'argile stabilisée avec 10% du couple ciment Portland-chaux. En effet, les performances sont doublées. Afin de fabriquer un liant avec un impact environnemental aussi faible que possible, il a été décidé d'utiliser le couple ciment Portland-chaux avec un dosage de 10% pour le reste de l'étude.



**Figure 2.** Variation de la résistance en compression en fonction du pourcentage d'ajout.

**Figure 3.** Variation de la résistance en flexion en fonction du pourcentage d'ajout.

**Tableau 1.** Variation de la masse volumique, de la résistance en compression et de la résistance en traction par flexion des argiles stabilisées en fonction du type de stabilisant et de sa teneur.

Type de stabilisant	Teneur en stabilisant (%)	0	4	6	8	10
Chaux (Thermo®)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1666±4.7	1436±1.4	1406±10.1	1388±5	1388±2.5
	Rc (MPa)	0.46±0.03	0.55±0.40	0.66±0.02	0.70±0.01	0.77±0.04
	Rf (MPa)	0.19±0.00	0.24±0.01	0.26±0.02	0.28±0.02	0.31±0.02
Ciment Portland	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1666±4.7	1429±1.8	1399±1	1393±7	1383±8.4
	Rc (MPa)	0.46±0.03	0.65±0.02	0.83±0.03	1.08±0.05	1.25±0.06
	Rf (MPa)	0.19±0.00	0.27±0.01	0.32±0.00	0.35±0.05	0.39±0.08
Couple Ciment Portland – Chaux (Thermo®) (50% CP et 50% C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1666±4.7	1386±17.5	1378±16.7	1373±6.1	1359±3.7
	Rc (MPa)	0.46±0.03	0.67±0.02	0.78±0.06	1.08±0.01	1.16±0.02
	Rf (MPa)	0.19±0.00	0.26±0.02	0.30±0.04	0.33±0.01	0.38±0.03

**Tableau 2.** Rapport et composition massique des composites.

	Rapport		Pourcentage		
	Ch/L	$E_{Total}/L$	Liant	Chanvre	Eau
CASC-0.4	0,4	0,76	46,3	18,5	35,2
CASC-0.455	0,455	0,78	44,7	20,3	35,0
CASC-0.5	0,5	0,80	43,5	21,7	34,8
CASC-0.75	0,75	1,00	36,4	27,3	36,3

### 2.3. Formulations et fabrication

Dans cette étude, différentes formulations sont produites en mélangeant des chènevottes avec le liant argileux stabilisé précédemment sélectionné. Les formulations diffèrent par le rapport chanvre sur liant (0,4, 0,455, 0,5 et 0,75). Le rapport chanvre sur liant est estimé en se référant aux mélanges traditionnels de béton de chanvre utilisés pour les applications dalle, mur et toit [CEC 07]. Tout d'abord, Les chènevottes sont pesées et mélangées avec l'eau de pré-mouillage des chènevottes à la main pendant environ 2 minutes dans un récipient avec un rapport massique eau sur chanvre de 0,4. Cette étape a pour rôle d'humidifier les chènevottes de façon à neutraliser leur fort pouvoir absorbant pour éviter qu'elles absorbent l'eau de gâchage nécessaire à la fluidité du liant. En même temps, le liant et l'eau de gâchage sont mélangés avec un rapport eau sur liant égal à 0.6 à l'aide d'un malaxeur (type Hobart) jusqu'à obtenir un mélange homogène (environ 2 minutes) pour former une pâte. Ensuite, les chènevottes humides sont progressivement ajoutées à la pâte de liant et le mélange est poursuivi pendant environ 5 minutes jusqu'à ce qu'un mélange homogène soit obtenu. Afin d'atteindre une consistance satisfaisante pour la réalisation du mélange et du moulage la quantité d'eau est ajustée. Les différents rapports et compositions de mélange utilisés sont résumés le tableau 2. Le mélange est ensuite placé dans des moules en 4 couches successives pour les moules cylindriques de 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur et en 2 couches pour les moules prismatiques de dimensions 10x10x7 cm<sup>3</sup>: chaque couche est compactée à 0,1 MPa [CEC 07]. Les moules sont huilés pour faciliter l'extraction de l'échantillon à partir du moule.

### 3.1. Caractérisation mécanique

Les essais mécaniques sont réalisés sur une presse INSTRON modèle 5588S de capacité 400 KN. Les essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse de chargement de 10 mm/min. Pour déterminer la résistance en compression, trois cylindres par formulation sont utilisés. Le protocole de test comprend deux cycles de chargement et de déchargement. Le premier déchargement démarre lorsque la charge atteint 1KN et le deuxième déchargement commence lorsque le déplacement atteint 10 cm. Le chargement cyclique permet d'analyser l'effet du chargement et du déchargement sur le comportement élastique. L'identification de la résistance en compression dans le cas d'un comportement compactant n'est pas définie par la communauté. L'industrie du bois utilise la force obtenue pour 10% de déformation. Dans notre cas, la résistance en compression est définie comme la transition entre le comportement réversible et le comportement de compactage. Donc, la résistance en compression a été établie comme la contrainte de changement de pente sur les courbes contrainte-déformation. On détermine trois modules qui peuvent être calculés comme le montre la figure 4. Le module apparent initial  $Ea1$  correspond à la pente au début du chargement de la courbe contrainte – déformation. Le module élastique  $Ee$  correspond à la pente de la partie linéaire du cycle de déchargement. Le second module apparent  $Ea2$  correspond à la pente de la portion linéaire au deuxième cycle de chargement de la courbe contrainte – déformation. Pour la résistance en traction par fendage, deux cylindres par formulation ont été testés en appliquant une charge linéaire sur la génératrice d'échantillon. La résistance en traction,  $Rt$ , en MPa a été calculée en utilisant l'équation [1].

$$Rt = \frac{2F_{\max}}{\pi dl} \quad [1]$$

Où  $F_{\max}$  est définie comme la résistance maximale à la rupture,  $d$  est le diamètre du cylindre en mm et  $l$  la longueur du cylindre en mm.

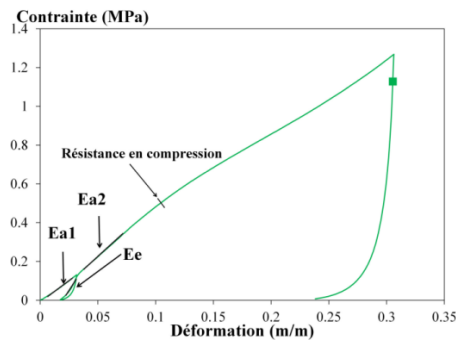


Figure 4. Identification du module apparent et élastique.

### 3.2. 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 du 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 ( $R^2$ ) élevé entre les données expérimentales et la courbe théorique [2].

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} (\ln(t) + k) \quad [2]$$

Où  $q$  est le flux de chaleur par (W/m),  $K$  est une constante qui inclut la diffusivité thermique du matériau,  $t$  le temps de mesure et  $T$  la température (°C). Pour mesurer la conductivité thermique, la sonde fil est placée entre deux échantillons plans. Le temps de chauffage utilisé est de 120 secondes et la puissance est de 0.205 W pour toutes les formulations. 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, deux couples sont formés avec quatre 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 deux couples.

### 3.3. Caractérisation hygrique

La caractérisation hygrique se base sur la mesure de valeur tampon hygrique MBV 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 AJCE - Special Issue

définie dans le Nord test Project ARDHI06]. Après stabilisation à 23°C et 50% HR (15 min), 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 [3].

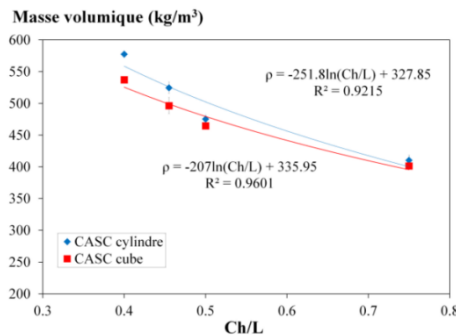
$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})} \quad [3]$$

Où MBV est la valeur tampon hygrique ( $g/(m^2 \cdot \%HR)$ ),  $\Delta m$  est variation de masse durant la phase d'adsorption ou désorption ( $g$ ),  $A$  est la surface d'échange ( $m^2$ ),  $HR_{haute}/HR_{basse}$  sont les humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%). La méthode de test recommande des échantillons prismatiques étanchés sur cinq des six côtés, avec une surface d'échange supérieure à  $100 \text{ cm}^2$  pour chaque échantillon et une surface totale d'échange supérieure à  $300 \text{ cm}^2$  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 alors été proposée [ROD 05]. 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 toutes les cinq minutes avec des sondes sensirion SHT 75. La vitesse d'air est mesurée au voisinage des échantillons : les composantes verticales sont inférieures à 0,15 m/s alors que les composantes horizontales sont de l'ordre 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 lecture 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%.

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Masse volumique

On peut observer que la masse volumique diminue logarithmiquement avec le rapport chanvre sur liant (figure 5). Pour les échantillons cylindriques, elle varie entre  $410 \text{ kg/m}^3$  et  $578 \text{ kg/m}^3$  et pour les échantillons cubiques, elle est comprise entre  $401 \text{ kg/m}^3$  et  $537 \text{ kg/m}^3$ . La diminution de la masse volumique avec la teneur en chanvre peut s'expliquer par la densité de chanvre proprement dite et par une teneur en eau plus élevée.



**Figure 5.** Variation de la masse volumique en fonction du rapport Ch/L (23°C, 50% HR).

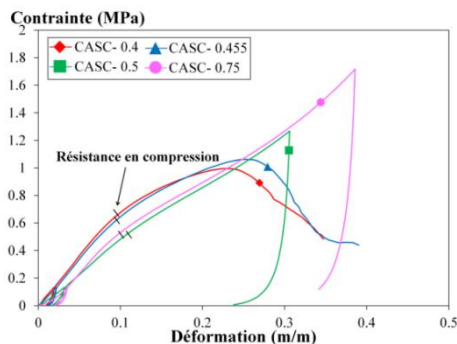
### 4.2. Caractérisation mécanique

Pour chaque formulation, 3 éprouvettes cylindriques ont été testées en compression simple et 2 éprouvettes cylindriques ont été testées en traction par l'essai de fendage. Les courbes contrainte - déformation des formulations sont représentées en figure 6. Les valeurs moyennes de résistance en compression, résistance en traction, module élastique ( $E_e$ ) et les deux modules apparents ( $E_{a1}$  et  $E_{a2}$ ) obtenus pour chaque formule sont donnés dans le tableau 3. La figure 6 présente des courbes de contrainte-déformation typiques de compression pour les composites avec différent rapport Ch/L. Pour les formulations avec un rapport Ch/L égal à 0,4 et 0,455, la contrainte maximale apparaît pour des déformations comprises entre 25% et 30%. Pour les autres formulations, la compression ne conduit pas à un maximum de la courbe, mais induit un compactage continu avec augmentation de la contrainte. Ce phénomène de compactage est similaire à ce qui est observé dans certains matériaux très poreux sous compression ou contrainte d'indentation [ARN 12] et [NGU 09]. La résistance en compression a été établie comme la contrainte de changement de pente telle que mentionnée sur chaque courbe

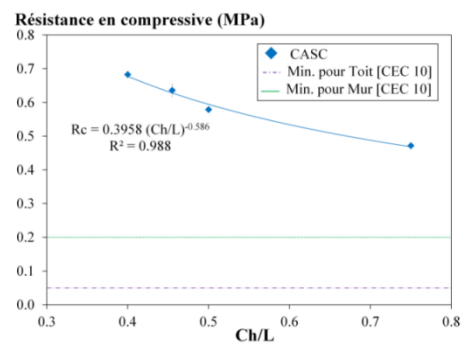
de la figure 6. Les différentes propriétés mécaniques obtenues sont résumées dans le tableau 3. Les résultats montrent que la résistance en compression de toutes les formulations est comprise entre 0,47 MPa et 0,68 MPa. Pour le béton de chanvre, la résistance en compression varie de 0,1 MPa à 0,8 MPa [ARN 12] et [ELF 08]. On constate que la résistance en compression de tous les matériaux composites produits répond aux exigences de l'usage prévu par les règles professionnelles françaises pour les structures en béton de chanvre [CEC 10]. On constate que la résistance en compression diminue avec le rapport Ch/L (figure 7). En effet, elle diminue de 31% lorsque le rapport Ch/L varie de 0,4 à 0,75. La diminution de la résistance avec le rapport Ch/L peut être expliquée par l'augmentation de la porosité, ce qui est indiqué par certains travaux sur des matériaux similaires [JOR 92] et [MAC 99]. La résistance en compression des matériaux étudiés est fortement influencée par la variation de la masse volumique (figure 8). La résistance des composites est améliorée lorsque la masse volumique augmente. Ces résultats sont similaires à ceux observés sur le béton de chanvre [ARN 12] et [ELF 08]. La variation de la résistance en traction du composite en fonction du rapport Ch/L et en fonction de la masse volumique est résumée dans le tableau 3. La résistance en traction est fortement influencée par le rapport Ch/L. En effet, elle diminue de 55% lorsque le rapport Ch/L varie de 0,4 à 0,75. Comme pour la résistance en compression, la résistance en traction augmente de façon linéaire avec la masse volumique. Le module apparent et le module élastique diminuent lorsque le rapport Ch/L augmente. Cela est principalement dû à la diminution de la masse volumique.

**Tableau 3.** Propriétés mécaniques des différentes formulations.

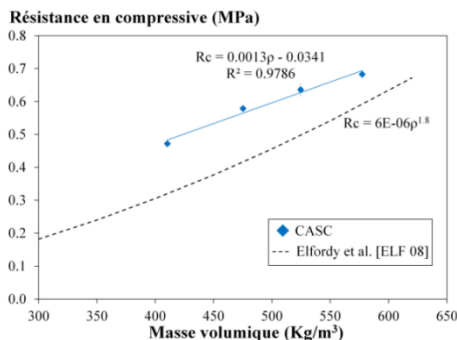
Formulations	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	R <sub>C</sub> (MPa)	R <sub>T</sub> (kPa)	Ea1 (MPa)	Ee (MPa)	Ea2 (MPa)
CASC -0.4	577.41	0.68±0.01	58.84±0.41	7.36±0.64	55.97±0.34	7.58±0.13
CASC -0.455	524.60	0.64±0.19	48.81±0.63	5.96±0.42	48.28±0.61	7.01±0.36
CASC -0.5	475.22	0.58±0.01	35.58±3.80	4.76±0.42	36.56±0.83	5.47±0.15
CASC -0.75	410.28	0.47±0.01	26.28±0.87	4.58±0.81	25.96±0.68	5.76±0.08



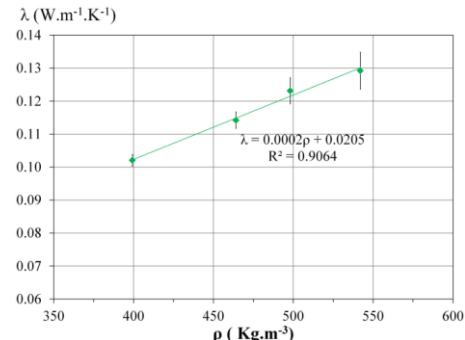
**Figure 6.** Comportement mécanique en compression du composite après 3 mois, conservation : 23°C 50%HR.



**Figure 7.** Variation de la résistance en compression en fonction du rapport Ch/L.



**Figure 8.** Variation de la résistance en compression en fonction de la masse volumique.



**Figure 9.** Conductivité thermique des formulations en fonction de la masse volumique (23°C, 50% HR).

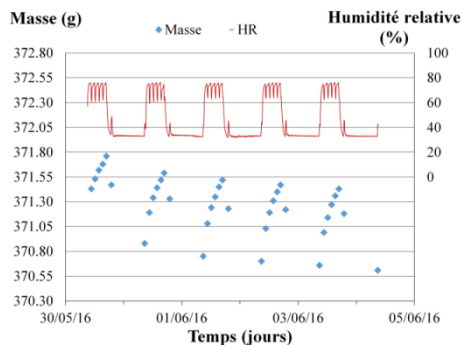
#### 4.3. Caractérisation thermique

Les mesures de conductivité thermique 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 composite.

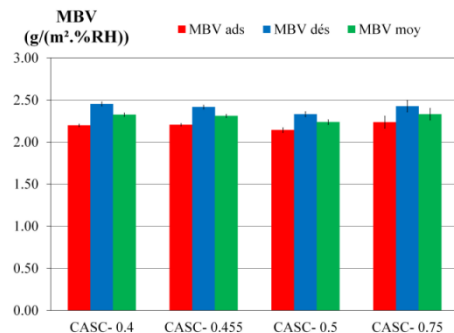
La conductivité thermique du béton de chanvre à 15%HR est de 0.116 W/(m.K) et de 0.10 W/(m.K) à 65%HR. Cette relation a déjà été soulignée par plusieurs auteurs qui s'intéressent aux caractéristiques thermiques du béton de chanvre [CER 05]. [NGU 10] [WAL 14]. La conductivité thermique des composites varie entre 0.102 W/(m.K) et 0.129 W/(m.K) pour des masses volumiques s'échelonnant entre 399 kg/m<sup>3</sup> et 542 kg/m<sup>3</sup>. Les valeurs de conductivité thermique obtenues pour les composites réalisés dans cette étude sont du même ordre que 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/m<sup>3</sup>. 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/m<sup>3</sup>.

#### 4.4. Caractérisation hygrique

La figure 10 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'adsorption (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 montré 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 demie [ROE 05]. La figure 10 présente également un exemple de cinétique de prise/perte 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/perte de masse et ainsi pour la valeur tampon hygrique. La figure 11 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 10) 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. La valeur tampon hygrique moyenne varie entre 2,24 et 2,33 g/(m<sup>2</sup>.%HR). Selon la classification de NORDTEST project, tous les matériaux étudiés sont classés excellents régulateurs hygriques (MBV > 2 g/(m<sup>2</sup>.%HR)). 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/(m<sup>2</sup>.%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/(m<sup>2</sup>.%HR) [COL 15].



**Figure 10.** Ambiance d'humidité relative lors de l'essai et exemple de cinétique de prise/perte de masse d'un échantillon.



**Figure 11.** Valeurs tampon hygrique (MBV) des différentes formulations en phase d'adsorption, de désorption et valeur moyenne à 23°C.

#### 5. Conclusion

Cette étude s'intéresse à l'utilisation d'argile comme liant pour élaborer des composites de chanvre avec plusieurs rapports chanvre sur liant et étudie leur effet sur les propriétés mécaniques, thermiques et hygriques. La masse volumique des composites développés est comprise entre 401 et 578 kg/m<sup>3</sup>. Les résultats montrent que les propriétés mécaniques dépendent du rapport chanvre sur liant. En effet, la résistance en compression est comprise entre 0,47 et 0,68 MPa et la résistance en traction est comprise entre 0,026 et 0,058 MPa lorsque le rapport chanvre sur liant est compris respectivement entre 0,75 et 0,4. Les résultats montrent que les composites ont un module apparent inférieur aux exigences de l'utilisation prévue [CEC 10]. Le module apparent n'est pas très représentatif du comportement élastoplastique réel de ce type de matériau. Pour cette raison, nous préférons

considérer le module élastique MPaE (déterminé sur les acy 2018 de charge) comme valeur représentative. Sur cette base, les matériaux testés atteignent la valeur recommandée par les règles professionnelles françaises pour les structures en béton de chanvre [CEC 10]. Les propriétés thermiques des composites obtenus sont intéressantes (comprise entre 0.102 et 0.129 W/(m.K) W/(m.K)), permettant d'envisager leur utilisation en isolation répartie. De plus, la valeur tampon hygrique des composites testés est supérieure à 2 g/(m<sup>2</sup>.%HR) ce qui les classe comme excellents régulateurs hygriques, montrant ainsi tout l'intérêt de l'exploitation d'un liant argileux en substitution d'un liant formulé à base de chaux.

## 6. Bibliographie

- [AMZ 13] AMZIAN S., ARNAUD L., Bio-aggregate-based Building Materials, Applications to Hemp Concrete, *ISTE Ltd and John Wiley & Sons*, Inc 2013.
- [ARN 2012] ARNAUD L.; GOURLAY E.; Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*, Volume 28, 2012, pp 50-56.
- [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.
- [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.
- [CAG 14] CAGNON H., ET AL., Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy and Buildings*, Vol. 80, 2014, pp. 208–217.
- [CEC 07] Association Construire en Chanvre; FFB ; Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre, Ed. SEBTP, 2007. ISBN 9782915162448.
- [CEC 10] Construire en Chanvre, «Construire en Chanvre - Règles Professionnelles (RP2C)», France, 2010
- [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.
- [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.
- [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.
- [JOR 1992] JORILLO P., SHIMIZU G., Coir Fibre Reinforced Cement Based Composite. Part 2. Fresh and Mechanical Properties of Fiber Concrete Fibre Reinforced Cement and Concrete: *The Fourth International Symposium Held by RILEM*, University of Sheffield, E and FN Spon, UK, Sheffield (1992).
- [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.
- [MAC 99] R. MAC VICARA, L.M. MATUANAB, J.J. BALATINECZA, Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol.21, 1999, pp. 189–196.
- [NF 06] Norme NF EN 196-1 « Méthodes d'essais des ciments Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », 2006.
- [NGU 09] NGUYEN, T.T.; PICANDET, V.; AMZIANE, S.; BALEY, C.; Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, November 2009, Vol. 13, Issue 9, p. 1039-1050, ISSN 1964-8189.
- [NGU 10] NGUYEN T.T., PICANDET V., CARRE P., LECOMPTE T., AMZIANE S., BALEY C., Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Vol.14, 2010, pp. 545–560.
- [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., 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.
- [WAL 14] WALKER R., PAVÍA S., Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 64, 2014, pp. 270–276.11