

Influence de la formulation et du procédé de mise en œuvre sur les propriétés thermique, mécanique et hydrique du béton de chanvre

P. Glouannec^(a), F. Collet^(b), C. Lanos^(b), P. Mounanga^(c), T. Pierre^(a), P. Poullain^(c), S. Pretot^(b), J. Chamoin^(b)
A. Zaknoute^(a)

^a LIMATB, Université de Bretagne Sud, UEB, rue de Saint-Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex

^b LGCGM – Équipe Matériaux Thermo Rhéologie, 3 rue du Clos Courtel, 35704 Rennes Cedex 7

^c GeM UMR CNRS 6183 – IUT de Saint-Nazaire, 58 rue Michel Ange, BP 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex

RESUME:

Du point de vue de sa fabrication le béton de chanvre est obtenu en mélangeant un liant à base de chaux hydraulique et aérienne avec des particules végétales et de l'eau. Ce biomatériau de remplissage est utilisé pour la réalisation de parois, de dalles et de toitures. Il doit ainsi assurer des fonctions liées au comportement thermo-hydrique d'une enveloppe de bâtiment (isolation thermique, transferts d'humidité,...). Différentes formulations de type paroi associées à trois procédés de mise en œuvre sont étudiées. Une relation de type loi-puissance est mise en évidence entre la résistance à la compression et la densité apparente. Des mesures de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau permettent de définir la capacité d'isolation des matériaux. La caractérisation hydrique repose sur les capacités de stockage et de transfert d'humidité des matériaux. Ces aspects sont étudiés par la détermination des isothermes de sorption-désorption et de la perméabilité à la vapeur.

MOTS-CLES : *formulation, mise en œuvre, résistance en compression, conductivité thermique, perméabilité hydrique*

INTRODUCTION

Un des enjeux environnementaux et écologiques dans le domaine du bâtiment est la réduction significative des consommations d'énergie et l'utilisation de matériaux à faible énergie grise [1]. On voit ainsi se développer l'utilisation de matériaux bio-sourcés pour lesquels il est nécessaire d'atteindre des niveaux requis en termes de performances vis-à-vis des propriétés thermiques et mécaniques. Il s'avère également intéressant de connaître les propriétés hydriques afin d'appréhender le comportement en usage.

Le béton de chanvre illustre bien le cas de tels matériaux. Il est obtenu en mélangeant un liant à base de chaux avec des particules de chanvre (chènevotte et fibres). Appliqué au domaine de la construction, le béton de chanvre est utilisé depuis plusieurs années comme matériau de remplissage. Associé à une ossature bois pour les différentes parois des bâtiments (murs, toiture, plancher,...), il permet de constituer une enveloppe à isolation répartie. La mise en œuvre de ce matériau reste artisanale. L'amélioration de ces performances nécessite des études sur la formulation et les procédés mais également sur les méthodes de détermination des propriétés en usage.

Depuis quelques années, différents travaux ont été menés pour la caractérisation acoustique, mécanique, thermique et hydrique [2-7]. Ces études sont primordiales pour la mise en place d'une certification. Mais, il s'avère que les résultats présentés dans la littérature peuvent varier d'une façon importante [8] et ne sont pas forcément représentatifs du matériau en usage. Les mises en œuvre différentes et l'hétérogénéité du matériau induit des difficultés pour la détermination des propriétés. L'objet de la communication est de présenter une partie des travaux réalisés dans le cadre du projet ANR/Matériaux&Procédés « BETONCHANVRE (2007-2010) » pour répondre à cette problématique. Ce programme associe trois laboratoires universitaires (LIMATB, LGCGM, GeM) et trois entreprises du secteur (Easychanvre, SI2C, Terrachanvre).

Dans la première partie de la communication les méthodes de caractérisation mises en place sont décrites. La seconde partie est consacrée à la présentation des valeurs mesurées.

FORMULATIONS ET MISE EN ŒUVRE DES EPROUVETTES

Le béton de chanvre est un mélange d'eau, de chaux, et de particules végétales. Les formulations diffèrent par le type de liant, le type de granulats (chènevotte, fibre) et les proportions des constituants.

Dans le cadre de ces travaux, la fabrication des éprouvettes a été réalisée par des moyens de type industriel. Trois types de mise en œuvre ont été exploités (Tableau 1).

Lors de la mise en œuvre par projection (procédé A), le mélange « liant – chènevotte » est brassé à sec, l'eau est ajoutée uniquement en bout de la lance de projection par le biais d'une buse (Figure 1.a).

Pour les procédés B et C, les trois constituants sont mélangés avant le remplissage des moules. Pour le matériau C, le « mélange – malaxage » a été effectué dans une bétonnière et le produit a été légèrement compacté dans les moules. Dans le procédé industriel B, la pâte de chaux aérienne, la chaux hydraulique et le chanvre sont mélangés dans un mélangeur à bi-vis contrarotatives (Figure 1.b). Le mélange obtenu est ensuite acheminé vers les moules, remplis sous vibration.

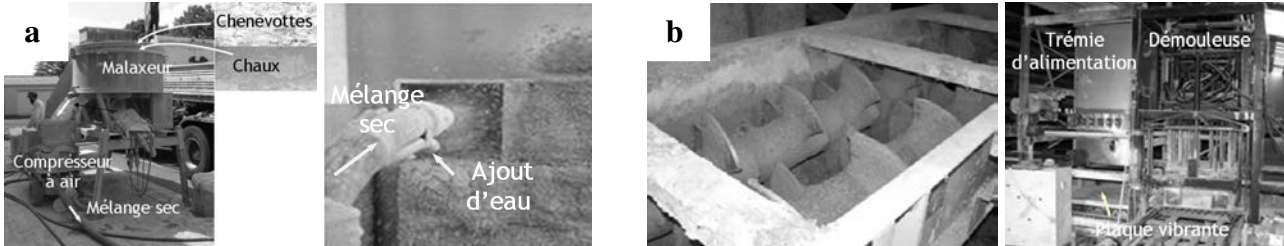


Figure 1. Procédés de mise en œuvre des bétons de chanvre (a. Procédé A, b. Procédé B)

Les bétons de chanvre de Types A et C sont fabriqués avec du Tradical® PF70 (Tableau 1). Il s'agit d'un liant à base de chaux aérienne (75%), de liants hydrauliques (15%) et pouzzolanique (10%). La distribution granulométrique de la poudre anhydre est donnée à la Figure 2. Pour le béton de chanvre de Type B, le liant utilisé est une préparation propre à la société. Il s'agit d'un mélange de lait de chaux et de chaux hydraulique.

Deux types de particules végétales peuvent entrer dans la composition du béton de chanvre : les particules fibreuses et la chènevotte. La chènevotte est la partie interne de la tige de chanvre alors que la partie fibreuse en est la partie externe. Les matériaux A et B sont à base de chènevotte, tandis que les bétons C contiennent un chanvre fibré (mélange de chènevotte et de fibre). La Figure 2 présente une étude granulométrique des deux types de particules.

Tableau 1. Composition des bétons de chanvre étudiés

Matériau	Procédé	Type de Liant	Granulats
A	Projection	Tradical® PF70	Chènevotte
B	Moulage + vibrage	Lait de chaux + chaux hydraulique	Chènevotte
C	Moulage + compactage	Tradical® PF70	Chanvre fibré

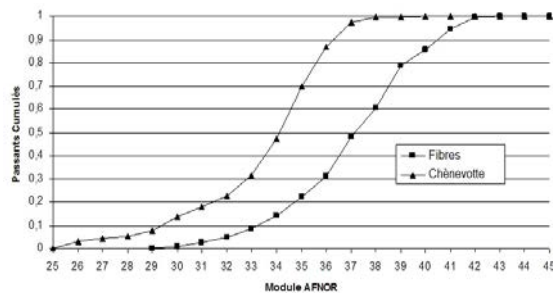


Figure 2. Courbes granulométriques des particules végétales

Les échantillons fabriqués par les trois entreprises partenaires se présentent sous la forme de blocs parallélépipédiques de $30 \times 30 \times 16 \text{ cm}^3$. Les blocs sont démoulés une semaine après leur fabrication et conservés en chambre climatique à $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative. Des essais de mesure de porosité à l'eau, de carbonatation, des propriétés mécaniques, thermiques et hydriques ont été réalisés.

METHODES DE MESURE ET DISPOSITIFS DE CARACTERISATION

Observation microstructurale et porosité accessible à l'eau

La porosité ouverte accessible à l'eau a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur carottées dans des blocs de béton de chanvre matures. La porosité ouverte n du béton de chanvre peut être estimée à partir de l'équation suivante:

$$n = \frac{(M_{saturée} - M_{sèche})}{(M_{saturée} - M_{immergée})} \quad (1)$$

Où $M_{saturée}$ est la masse de l'échantillon saturé (g) en eau pendant 48 h, $M_{sèche}$ est la masse de l'échantillon après passage à l'étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$), et $M_{immergée}$ la masse de l'échantillon en conditions hydrostatiques (saturées et immergées dans l'eau).

Caractérisation mécanique

A échéance prévue, les éprouvettes sont pesées puis testées en compression sur leurs faces latérales, initialement en contact avec les parois du moule bakérisé. Les faces des échantillons n'ont subi aucun surfacage préalable. Afin d'étudier l'influence du plan de sollicitation sur les propriétés mécaniques des bétons, deux éprouvettes de chaque béton mature (âgé de plus d'un mois) ont été découpées dans le sens longitudinal et les deux demi-éprouvettes obtenues ont été testées dans deux directions différentes.

Les essais de compression sont réalisés avec une presse électromécanique équipée d'un capteur de force 50 kN et d'un plateau supérieur rotulé à la traverse. La vitesse de la traverse a été fixée à 5 mm/min, conformément aux travaux de Cerezo [4]. Les dimensions des plateaux de la presse sont de 16×30 cm. L'enregistrement du déplacement de la traverse et de la force appliquée permet d'accéder aux propriétés mécaniques (résistance à la compression et module d'élasticité) des éprouvettes.

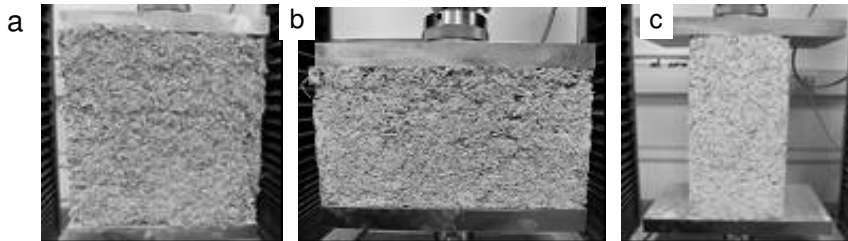


Figure 3. Illustrations des différentes tailles d'éprouvettes testées (a. Eprouvette entière $30 \times 30 \times 16$ cm ; b. Demi-éprouvette horizontale, testée sur la face 30×15 cm ; c. Demi-éprouvette verticale testée sur la face 15×16 cm)

Caractérisation hydrique

La caractérisation hydrique repose sur la mesure de l'isotherme de sorption à 23°C ainsi que sur la mesure de la perméabilité à la vapeur.

La mesure des isothermes de sorption est basée sur la méthode discontinue par paliers successifs d'humidité relative ambiante croissante [norme 12571]. Le séchage initial est réalisé en chambre sèche avec du gel de silice puis sous vide. Les mesures sont réalisées sans atteindre l'équilibre hydrique des échantillons. En effet, un modèle exponentiel permettant de décrire les cinétiques de sorption a été défini [augc2009]. L'ajustement des paramètres de ce modèle permet d'identifier la teneur en eau à l'équilibre sans l'atteindre expérimentalement. Ceci permet de réduire le temps de mesure et de limiter les durées d'exposition des échantillons aux différentes humidités. En effet, une exposition prolongée aux humidités élevées peut aboutir à l'apparition de moisissures changeant ainsi la nature du matériau. Les mesures sont réalisées sur cinq à six échantillons pour les différents matériaux. Ces échantillons ont un diamètre (ou un côté) d'environ 5 cm et une hauteur d'environ 7 cm ce qui renferme le volume élémentaire représentatif (VER) du matériau et assure une mesure représentative à l'échelle macroscopique.

La mesure de perméabilité à la vapeur est réalisée selon la méthode de la coupelle à 23°C [norme 12572]. Le couple d'humidités relatives testé est (0 ; 50%). L'ambiance sèche est obtenue par du gel de silice placé dans la coupelle. L'ambiance 23°C ; 50% est maintenue par la climatisation de l'ambiance d'essai. Les mesures sont réalisées sur trois échantillons pour chaque matériau. Ces échantillons ont une hauteur d'environ 5 cm et un diamètre d'environ 10 cm ce qui comprend aussi le VER des bétons de chanvre et conduit à une mesure représentative à l'échelle macroscopique.

Caractérisation thermique

Du fait de la difficulté de la mesure des propriétés thermo-physiques dans le cas de matériaux fortement hétérogènes, deux méthodes de caractérisation ont été exploitées : une fonctionnant en régime stationnaire, la plaque chaude gardée, et une en régime transitoire, le fil chaud.

La mesure directe de la conductivité peut s'effectuer par la méthode de la plaque chaude gardée. Il existe différentes versions dont une description complète est donnée par Pratt [12] et Klarsfeld [13]. Le principe de

base de la méthode est d'imposer en régime permanent un écart de température « ΔT » entre les 2 faces d'un échantillon de forme parallélépipédique. Pour s'assurer d'un transfert de chaleur unidirectionnel, une condition adiabatique est imposée sur les faces latérales et du côté plaque chaude. Dans le montage asymétrique utilisé (Figure 4a), l'écart de température imposé entre les deux faces de l'échantillon est de l'ordre de 15°C afin de limiter l'incertitude de la méthode estimée à 10%. Cette méthode nécessite une très bonne planéité de l'échantillon. Le gradient thermique appliqué peut induire des phénomènes de thermo-migration non négligeables dans un milieu poreux.

Le recours à des méthodes transitoires permet de minimiser ce problème du fait des durées d'expérimentation beaucoup plus courtes. Ainsi, la méthode du fil chaud qui permet d'accéder en régime transitoire à la conductivité et à la diffusivité thermique de matériaux a-t-elle également été exploitée. Dans le dispositif utilisé, le fil chauffant possède un diamètre de 3,5mm et une longueur de 14cm. Trois thermocouples de 0,1mm de diamètre soudés en trois points différents le long du fil mesurent l'augmentation de température $T(t) - T_o$ au cours du temps.

Pour des temps longs, l'équation analytique complète prenant en compte le rayon du fil et la résistance de contact est [14] :

$$T(t) - T_o \approx \frac{\varphi}{4\pi\lambda_{eff}L} \ln(t) + \varphi \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a_{eff}}}\right)}{2\pi\lambda_{eff}L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda_{eff}L} \right] \quad (2)$$

où φ est la puissance dissipée (W), L la longueur du fil (m), r_0 son rayon (m), R_c la résistance de contact entre le fil et le béton ($K.W^{-1}$), et $\gamma = 0,577215$ la constante d'Euler. Cette équation est fonction de la conductivité λ_{eff} ($W.m^{-1}.K^{-1}$) et de la diffusivité thermiques a_{eff} ($m^2.s^{-1}$) effectives du milieu. Un programme d'estimation de paramètres permet de déterminer ces deux grandeurs ainsi que la résistance de contact entre le fil et le béton R_c (Figure 4b).

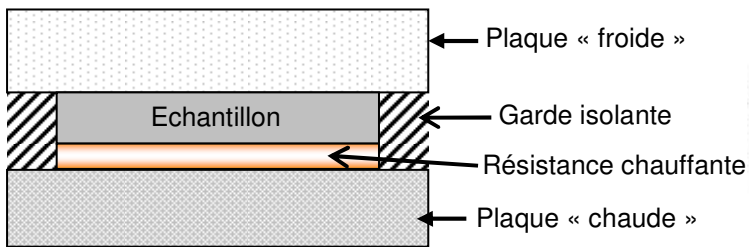


Figure 4a : Dispositif plaque chaude gardée.

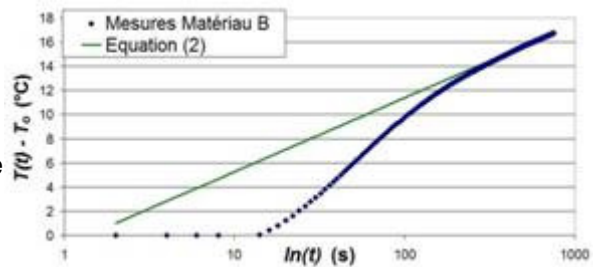


Figure 4b : Résultats d'une mesure fil chaud sur un béton de chanvre.

Caractérisation physico-chimique

Parallèlement à la caractérisation des bétons de chanvre, différentes mesures ont été réalisées sur le liant Tradical® PF70 et les granulats.

La mesure du flux de chaleur de réaction est utilisée pour étudier la cinétique d'hydratation de pâtes de chaux Tradical® PF70. Les essais ont été réalisés avec un microcalorimètre isotherme TAM Air, à une température d'essai constante de 20°C et un calorimètre SETARAM. La première mesure de flux est réalisée environ 10 minutes après la fin du malaxage. On considère que, dans ce laps de temps, la quantité de chaleur non mesurée reste faible par rapport à la quantité totale de chaleur dégagée pendant la période d'investigation.

Les temps de début et de fin de prise des pâtes de chaux ont été déterminés à 20 ± 1 °C selon la procédure décrite dans la norme EN 196-3 au moyen de l'appareil de Vicat.

Les propriétés mécaniques ont également été mesurées sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16$ cm, conservées en salle humide (20 ± 1 °C, $50 \pm 5\%$ d'humidité relative) jusqu'à l'échéance de l'essai. Le module d'Young dynamique est obtenu à partir de la fréquence de vibration dans l'éprouvette enregistrée par un appareil Grindosonic®. La résistance en compression est mesurée sur des demi-éprouvettes rompues en flexion.

RESULTATS ET DISCUSSION

Propriétés du liant et des granulats

Evolution physico-chimique et mécanique du liant

Des mesures par calorimétrie isotherme de la cinétique de prise de trois pâtes de chaux Tradical® PF70 à différents rapports massiques Eau/Chaux ($E/C = 0,5$; $0,7$ et 1) ont été réalisées. La figure 5 présente les résultats. L'augmentation du rapport E/C engendre un accroissement significatif de la cinétique de prise du liant. Cette influence décroît rapidement à mesure que le rapport E/C augmente.

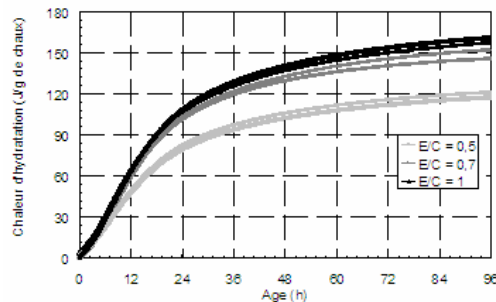


Figure 5. Evolution du dégagement de chaleur de différentes pâtes de chaux Tradical® PF70

La Figure 6 présente le résultat des essais de prise Vicat réalisés sur deux pâtes de chaux de rapport E/C différents. Le début de prise, correspondant à une pénétration de l'aiguille Vicat de 36 mm dans la pâte, apparaît plus tôt pour la pâte de chaux de plus faible E/C : il est mesuré à 3,1 h pour la pâte à $E/C = 0,5$, contre 5,3 h pour la pâte à $E/C = 0,6$.

A cet âge, les mesures de dégagement de chaleur n'ont pas montré de différence significative d'hydratation entre les différentes pâtes de chaux (Figure 5). Ce décalage de début de prise s'explique donc principalement par la consistance et la fraction solide plus élevées de la pâte de faible rapport E/C : pour un même volume d'hydrates formés, le seuil de percolation, marquant le début de prise, est plus rapidement atteint lorsque le rapport E/C est plus faible.

La fin de prise est plus difficile à détecter car les pâtes de chaux développent un retrait significatif : la profondeur de pénétration mesurée à l'aiguille Vicat en fin d'essai est fortement influencée par ce retrait. En considérant que la fin de prise correspond au palier observé en fin d'essai, on peut estimer la fin de prise à environ 11,5 h pour la pâte de chaux à $E/C = 0,5$ et à environ 13,5 h pour la pâte de chaux à $E/C = 0,6$. Ce décalage est sensiblement égal à celui mesuré pour le début de prise.

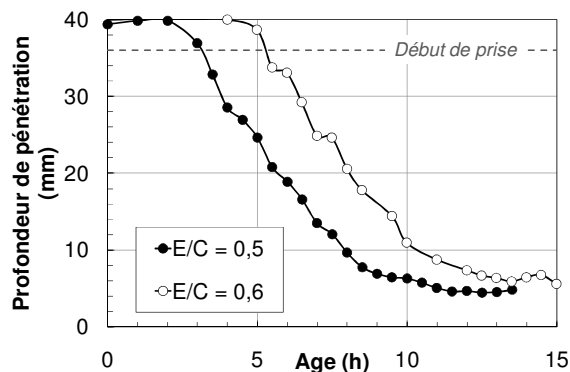


Figure 6. Essai de prise Vicat sur deux pâtes de chaux Tradical® PF70 à 20 °C

L'évolution des propriétés mécaniques de pâtes de chaux est présentée à la Figure 7. On observe que l'augmentation du rapport E/C engendre une chute importante des performances mécaniques de la matrice minérale dès le très jeune âge et à plus long terme. Cette diminution des propriétés mécaniques s'explique par l'augmentation de porosité du matériau liée à l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage initiale.

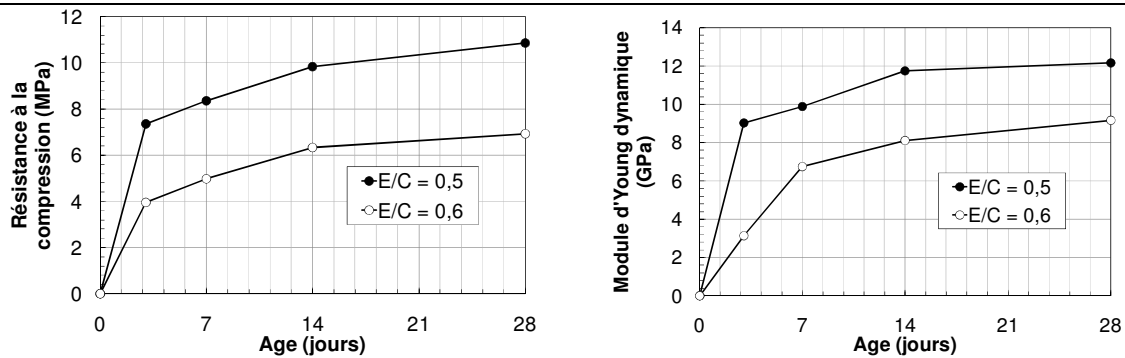


Figure 7. Evolution des propriétés mécaniques de deux pâtes de chaux Tradical® PF70 à 20°C

Conductivité thermique

Les premières mesures concernent la caractérisation des particules végétales (indice pv) et du liant (indice l) séparément. La conductivité thermique apparente des particules est mesurée à l'aide du fil chaud pour différentes masses volumiques (en appliquant une certaine compression sur un volume de particules). Ces mesures sont réalisées pour une humidité relative de 50%.

La caractérisation du liant a été effectuée par des mesures sur des échantillons de dimensions $10 \times 10 \times 3 \text{ cm}^3$ à plusieurs humidités relatives (0% et 50%) par la méthode de la plaque chaude gardée. La conductivité thermique augmente avec la teneur en eau.

Les Tableaux 2 et 3 regroupent les résultats obtenus pour plusieurs masses volumiques. Ils sont proches de ceux trouvés dans la littérature [4-6]. Il apparaît que la conductivité thermique varie avec la masse volumique. De plus, ces valeurs de conductivité encadrent celles obtenues pour le béton de chanvre comme présenté sur la Figure 13.

Chênevotte		Chanvre fibré	
ρ_{pv} kg.m ⁻³	λ_{pv} W.m ⁻¹ .K ⁻¹	ρ_{pv} kg.m ⁻³	λ_{pv} W.m ⁻¹ .K ⁻¹
150	0,07	145	0,07
152	0,07	148	0,08
177	0,11	156	0,10

Tableau 2 : conductivités thermiques des particules végétales (HR = 50%).

HR = 0%		HR = 50%	
ρ_l kg.m ⁻³	λ_l W.m ⁻¹ .K ⁻¹	ρ_l kg.m ⁻³	λ_l W.m ⁻¹ .K ⁻¹
990	0,20	1004	0,25
978	0,21	997	0,25

Tableau 3 : conductivités thermiques du liant.

Propriétés des bétons de chanvre

Le Tableau 4 présente les proportions de liant et de particules végétales utilisées pour réaliser les éprouvettes testées. Il s'agit de formulations de type mur.

Matériau	Liant (% massique)	Granulats (% massique)	Teneur en eau initiale	Porosité ouverte	Porosité totale	Teneur en eau saturation
A	~66	~34	0,41 kg.kg ⁻¹	0,5 – 0,56	0,77	140%
B	~65	~35	0,85 kg.kg ⁻¹	-	0,79	
C	~68	~32	0,85 kg.kg ⁻¹			

Tableau 4 : composition en fraction massique pour les formulations de type paroi

Propriétés mécaniques

Faciès de rupture des éprouvettes

La figure 8 présente des exemples d'éprouvettes matures testées en compression. La rupture se fait principalement par cisaillement, selon un plan de rupture différent pour les éprouvettes de Types A (figure 8.a) et celles de B et C (figures 8.b et 8.c). Sur les demi-éprouvettes testées selon deux directions normales, les modes de rupture sont très différents (figures 8 d et 8 e). Dans le cas des demi-éprouvettes verticales, le plan de rupture est clairement identifié (figure 8 d) et la contrainte en compression passe par un maximum avant de décroître lentement, tandis que pour les demi-éprouvettes horizontales (figure 8 e), on observe un écrasement du matériau avec une augmentation continue de la contrainte. La résistance à la compression est alors prise égale à la valeur correspondant à la limite du comportement élastique, en accord avec les travaux d'Elfordy *et al.* [7].

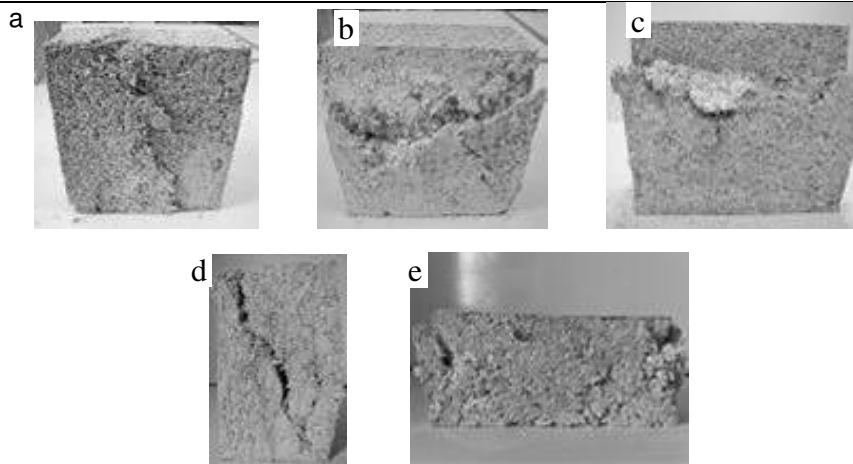


Figure 8. Illustrations de différents faciès de rupture. a. Epreuve de Type A ; b. Epreuve de Type B ; c. Epreuve de Type C ; d. Demi-épreuve verticale (Type C), sollicitée sur la face 15 × 16 cm ; e. Demi-épreuve horizontale (Type B), sollicitée sur la face 30 × 15 cm

Résistance en compression,

Une relation de type loi-puissance semble exister entre la densité apparente ρ et la résistance à la compression R_c des matériaux matures (Figure 9). On observe une dispersion assez importante des masses volumiques apparentes entre les éprouvettes même lorsqu'elles sont réalisées par le même procédé de fabrication

Les courbes modèles obtenues par Elfordy *et al.* [7] sur béton de chanvre projeté, ont été ajoutées pour comparaison. Le procédé de mise en œuvre du béton (projeté en voie sèche ou moulé) présente l'effet le plus significatif sur la relation $R_c(\rho)$ mise en évidence sur nos résultats. En effet, pour une densité donnée, le procédé par projection en voie sèche permet d'obtenir des résistances largement supérieures à celles mesurées sur les blocs mis en place par moulage.

On observe également que les demi-éprouvettes sollicitées horizontalement et verticalement, bien que présentant des faciès de rupture différents, manifestent des résistances à la compression du même ordre de grandeur, pour un même type de béton de chanvre.

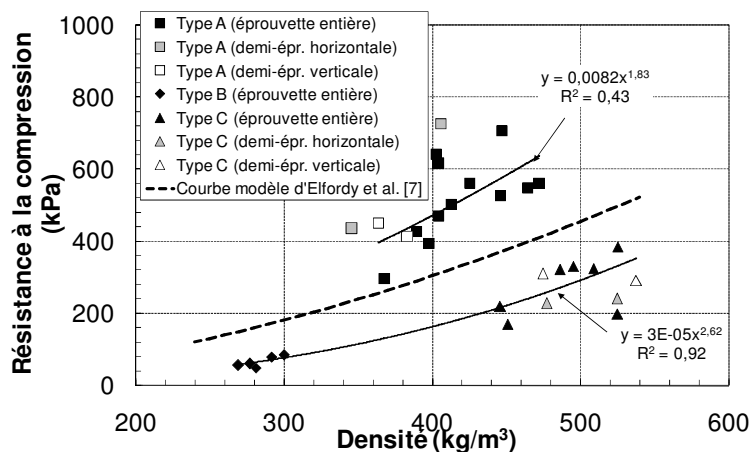


Figure 9. Résistance à la compression des éprouvettes en fonction de leur densité apparente

Propriétés thermiques

Sur les Figures 10 et 11 sont reportées différentes mesures de la conductivité apparente faites sur les éprouvettes de béton de chanvre par plaque chaude gardée et fil chaud et pour trois humidités relatives différentes : 0% → ◆, 25% → ●, 50% → ▲.

La conductivité thermique λ_{eff} est tracée en fonction de la masse volumique du produit sec. Même si les points sont assez dispersés, la tendance est que la conductivité augmente linéairement avec la masse volumique et la teneur en eau. Cependant, pour HR = 90% (■) les mesures ne sont plus exploitables, le temps de stabilisation des échantillons étant important, les matériaux présentaient des traces de moisissure.

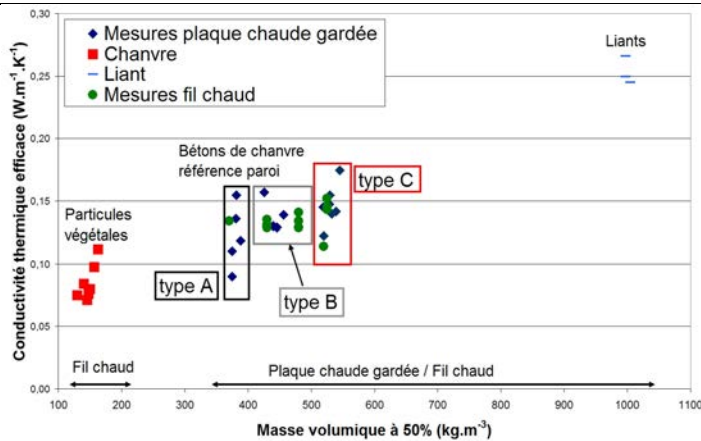


Figure 10 : Conductivité thermique efficace en fonction de la masse volumique à 50% d'humidité pour les différentes formulations.

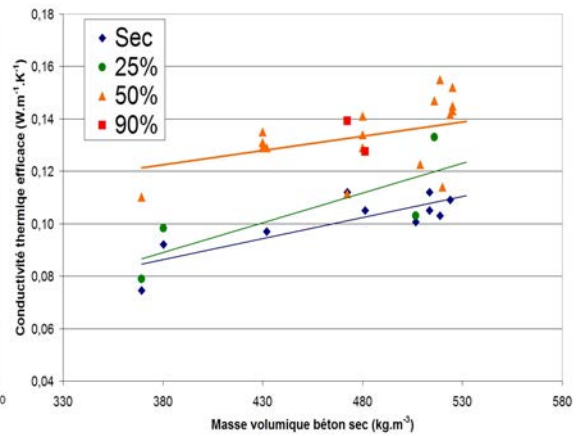


Figure 11 : Conductivité thermique efficace en fonction de la masse volumique du produit sec pour les différentes formulations.

Le Tableau 5 ci-dessous regroupe les estimations de trois paramètres de l'équation (2) : λ_{eff} , a_{eff} et R_c . Ces résultats sont également insérés sur la Figure 10. Les paramètres sont estimés avec une erreur de 7%. Les résultats obtenus sont assez dispersés mais en accord avec ceux rencontrés dans la littérature pour chacun des trois paramètres λ_{eff} , a_{eff} concernant ce type de matériau [4-6 ; 8].

Matériau	λ_{eff} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	a_{eff} (10 ⁻⁷ m ² .s ⁻¹)	R_c (K.W ⁻¹)
A	0,146	2,9	2,2
	0,147	3,5	1,8
B	0,155	3,3	1,8
	0,164	4,5	2,5
C	0,156	3,4	1,3
	0,129	4,5	2,7

Tableau 5 : valeurs obtenues à partir de l'équation (2).

Propriétés hydriques

Les figures 12 et 13 présentent les propriétés hydriques des bétons de chanvre A, B et C. La figure 12 donne les isothermes de sorption (valeur moyenne et écart-type). Les isothermes de sorption mesurées sur les trois matériaux présentent des allures et des valeurs similaires jusqu'à 90%HR. La quantité d'eau adsorbée étant liée à la surface spécifique du matériau et à sa porosité, ces résultats sont cohérents avec le fait que les matériaux présentent des porosités similaires.

Aux humidités relatives les plus faibles (jusqu'à 81% HR), le matériau A présente les teneurs en eau les plus importantes alors que le matériau B donne les valeurs les plus faibles. A partir de 81% HR, le matériau B présente des teneurs en eau plus importantes que les matériaux A et C. L'évolution de teneur en eau est plus importante pour le matériau B, celui-ci est donc plus hygroscopique que les matériaux A et C.

La figure 13 donne les perméabilités à la vapeur mesurées à (0 ; 50%). Ces valeurs sont également comparables pour les trois matériaux : de l'ordre de 2,5 à 2,6.10⁻¹¹ kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹. Ces perméabilités conduisent à des facteurs de résistance à la vapeur d'eau similaires à ceux des bétons de bois.

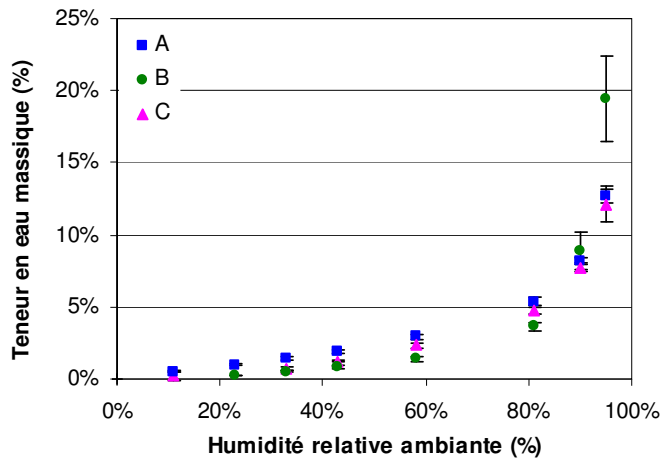


Figure 13. Isotherme d'adsorption à 23 °C des bétons de chanvre A, B et C

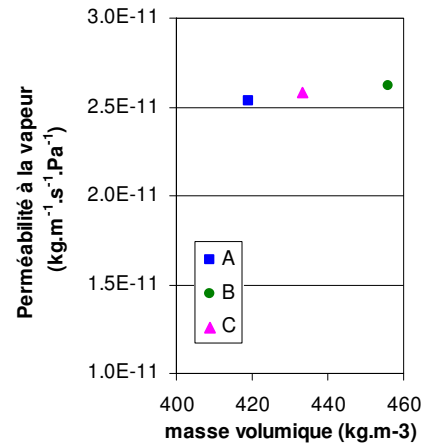


Figure 14. Perméabilité à la vapeur des bétons de chanvre A, B et C (essai à 23 °C, (0 ;50%)

CONCLUSION

La difficulté des études réalisées résulte de l'hétérogénéité des matériaux qui implique de travailler avec des échantillons de grandes dimensions (VER). Ainsi, afin de s'approcher au mieux des conditions de mise en œuvre réelle les différentes études sur les bétons de chanvre ont été menées sur des blocs.

Les résultats présentés ont montré la nécessité d'utiliser des moyens de caractérisation adaptés à ces matériaux.

En ce qui concerne les propriétés liées aux phénomènes de transfert dans les matériaux nous avons obtenu des valeurs sensiblement similaires pour la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur et les isothermes d'adsorption avec les trois procédés de mise en œuvre utilisés. On note toutefois une plus grande dispersion sur la conductivité thermique pour les éprouvettes de béton projeté.

Pour la résistance en compression, on observe qu'on aboutit à des valeurs plus importantes par projection. Ce résultat est vraisemblablement lié à la teneur en eau initiale plus faible du béton lors de la mise en œuvre par ce procédé par rapport aux deux autres procédés (B et C).

Remerciements

Nous remercions l'Agence Nationale de la Recherche ainsi que la région Bretagne pour le financement de ces travaux.

Références :

- [1] G. Escadeillas, *Les éco-matériaux dans la construction : enjeux et perspectives*, Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, (RF) 2B, Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
- [2] F. Collet, *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*, Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, 2004.
- [3] V. Desarnaulds, E. Costanzo, A. Carvalho, B. Arlaud, *Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials*, Twelfth International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal, 11-14 juillet 2005.
- [4] V. Cérézo, *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*, Thèse de Doctorat, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2005.
- [5] A. Evrard, *Sorption behavior of Lime-Hemp Concrete and its relation to indoor comfort and energy demand*, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Genève, Suisse, 6-8 septembre 2006.
- [6] F. Collet, M. Bart, L. Serres, J. Miriel, *Porous structure and water vapor sorption of hemp-based materials*, *Construction and Building Materials* 22(6), pp. 1271-1280 (2008).
- [7] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process*, *Construction and Building Materials*, 22(10), pp. 2116-2123 (2008).
- [8] Y. Hustache, L. Arnaud, *Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*, Construire en Chanvre (2008).

-
- [9] NF EN ISO 12571, *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment, Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*, Indice de classement P50-758, octobre 2000.
 - [10] F. Collet, S. Prétot, *Caractérisation hydrique de béton de chanvre projeté. Possibilité de mesure en régime dynamique ?*, XXVII^{èmes} rencontres universitaires de Génie Civil, Saint-Malo (2009).
 - [11] NF EN ISO 12572, *Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau*, 2001.
 - [12] A.W. Pratt, *Heat Transmission in Low Conductivity Materials*, Thermal Conductivity, Col. 1, R.P. Tye, Ed., Academic Press, London, pp. 301-405 (1969).
 - [13] S. Klarsfeld, *Guarded Hot Plate Method for Thermal Conductivity Measurements, Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, Vol. 2, Recommended Measurement Techniques and Practices, K.D. Maglic, A. Cezairliyan, and V.E. Peletsky, Eds., Plenum Press, New York, pp. 99-131 (1992).
 - [14] Y. Jannot, *Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides*, Habilitation à diriger des recherches, 2006.
 - [15] Règle TH-U – Fascicule 2/5, réglementation Thermique (2005).