

Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation.

Sylvie PRETOT ¹, Florence COLLET ¹, Patrick GLOUANNEC ², Vladislav LANG ³

¹Université européenne de Bretagne - Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique – Equipe Matériaux Thermo Rhéologie – IUT Génie Civil de Rennes – 3 rue du Clos Courtel 35704 Rennes cedex 7

²LIMATB EA4250 – Equipe thermique et énergétique, Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche, BP 92116 56321 Lorient cedex.

³New Technologies Research Centre, University of West Bohemia, Univerzitni 22, 306 14 Plzen, Czech Republic

Résumé - Cette étude concerne les propriétés thermiques des bétons de chanvre, matériaux à faibles impacts environnementaux. Différentes techniques de mise en œuvre (projection et moulage) et formulations sont prises en compte. Les conductivités thermiques sont mesurées grâce à différentes techniques expérimentales : sondes à chocs thermiques (sonde fil et hot disk) et méthode de la plaque chaude. Les résultats montrent que la conductivité thermique des bétons de chanvre pour les différentes formulations sont comprises entre 0,09 et 0,14 W.m⁻¹.K⁻¹.

Nomenclature

e	épaisseur de l'échantillon, m	<i>Symboles grec</i>	
q	flux linéique injecté, W.m ⁻¹	Φ_e	flux traversant l'échantillon, W
S	surface d'échange, m ² .	λ	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
t	temps, s	ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
T	température, K		
T_C	température de l'élément chauffant, K		
T_F	température de la plaque froide, K		

1. Introduction

La mise en œuvre de matériaux à faible empreinte écologique contribue à la diminution de l'impact environnemental des bâtiments. L'utilisation du béton de chanvre se développe donc dans le domaine de la construction en liaison avec les préoccupations environnementales actuelles. En effet, le béton de chanvre est constitué d'un mélange de chènevotte (bois du chanvre) qui est une matière première renouvelable et de liant naturel comme la chaux. Ce matériau a l'avantage d'avoir de bonnes propriétés thermiques, hydriques et acoustiques mais n'est pas porteur, ce qui conduit à le mettre en œuvre principalement en matériau de remplissage. Le béton de chanvre peut être utilisé pour l'ensemble des parois des bâtiments (murs, toiture, plancher...) constituant ainsi une enveloppe à isolation répartie.

Nous nous intéressons à la conductivité thermique du matériau selon ses différents usages. Différentes techniques de mise en œuvre et formulations sont prises en compte, dont celles utilisées par les sociétés SI2C et EASYCHANVRE, partenaires du projet ANR dont fait partie cette étude. La mise en œuvre se fait par projection (SI2C) ou par moulage (EASYCHANVRE) et compactage. Les formulations industrielles diffèrent par leur proportion de liant et de chènevotte conduisant à des masses volumiques comprises entre 290 et 520 kg/m³. Des formulations proposées par le laboratoire pour améliorer les propriétés mécaniques au jeune âge sont également testées.

2. Mise en œuvre et formulations

2.1. Formulations

Le béton de chanvre est constitué d'un liant et de chènevottes. Les formulations diffèrent par le type de liant, le type de chènevottes et les proportions des constituants (Tableau 1).

Formulation	Liant	Chanvre
SI2C- Réf - MUR	44 kg de chaux Tradical BCB T70	22 kg de chènevotte Chanvribat
SI2C - DALLE	55 kg de chaux Tradical BCB T70	22 kg de chènevotte Chanvribat
SI2C - TOIT	22 kg de chaux Tradical BCB T70	22 kg de chènevotte Chanvribat
SI2C – MUR – Terrachanvre*	44 kg de chaux Tradical BCB T70	22 kg de chanvre fibré Terrachanvre
Enduit	75 kg de chaux Tradichanvre BCB	11 kg de chènevotte Chanvribat
Enduit – terrachanvre Fine	75 kg de chaux Tradichanvre BCB	11 kg de chanvre fin Terrachanvre
EASY – réf - MUR	Lait de chaux (415 kg de chaux vive + eau), 158 kg de chaux hydraulique	3400 l de chanvre
LABO – F1	66 kg de liant formulé dont 44 kg de chaux Tradical BCB T70	33 kg de chènevotte Chanvribat
LABO – F2	66 kg de liant formulé dont 44 kg de chaux Tradical BCB T70	33 kg de chanvre fibré Terrachanvre
LABO – F3	66 kg de liant formulé dont 33 kg de chaux Tradical BCB T70	33 kg de chènevotte Chanvribat
LABO – F4	66 kg de liant formulé dont 22 kg de chaux Tradical BCB T70	33 kg de chènevotte Chanvribat

* Le chanvre fibré produisant des bourrages dans la machine de projection, les échantillons ont été réalisés à la main avec un léger compactage.

Tableau 1 : Composition des différentes formulations

2.2. Mise en œuvre : projection ou moulage

Lors de la mise en œuvre par projection le mélange de liant et de chènevottes est brassé à sec (Figure 1), l'apport d'eau se fait au niveau de la buse au moment de la projection (Figure 2).

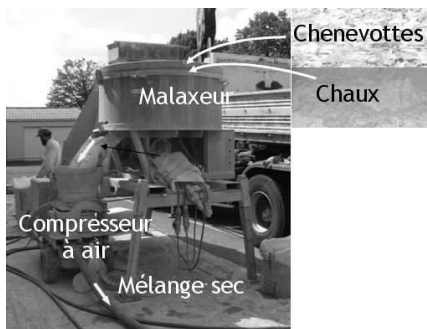


Figure 1 : Malaxeur

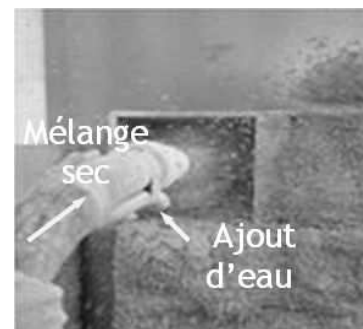


Figure 2 : Projection

Lors de la mise en œuvre par moulage de façon industrialisée, la pâte de chaux aérienne, la chaux hydraulique et le chanvre sont mélangés dans un mélangeur bi-vis contrarotatives (Figure 3). Le mélange obtenu est ensuite acheminé vers les moules, remplis sous vibration (Figure 4).



Figure 3 : Mélangeur

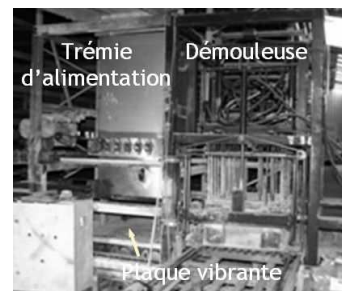


Figure 4 : Chaîne de moulage

Lors de la mise en œuvre par moulage au laboratoire, le liant et les chènevottes sont mélangés dans un malaxeur avec l'eau. La pâte obtenue est ensuite versée dans des moules puis tassée.

2.3. Echantillons utilisés

Afin de faciliter la manutention du matériau pour les essais en laboratoire, on fabrique des blocs de dimensions $30 \times 30 \times 16 \text{ cm}^3$. Les blocs sont pesés régulièrement jusqu'à stabilisation à 23°C 50% d'humidité relative ambiante. La masse volumique apparente est ensuite mesurée pour l'ensemble des blocs. Les mesures de conductivité sont alors réalisées sur des échantillons représentatifs de la masse volumique moyenne : des blocs entiers ou des échantillons prélevés dans les blocs et dont les dimensions contiennent le volume élémentaire représentatif.

3. Bancs Expérimentaux

3.1. Sonde fil

Cette méthode transitoire permet de limiter les problèmes de migration d'eau. Les mesures sont faites avec un CT-mètre qui est un appareil constitué :

- d'un organe de commande qui permet de régler les différents paramètres (puissance de chauffage, temps de chauffage...) et qui est relié à un ordinateur afin d'acquérir les points de mesure.

- d'une sonde souple destinée à être placée entre deux échantillons plans. Dans cette étude, nous utilisons une sonde fil (ou monotige), constituée d'un élément chauffant de 5 cm de longueur dont on mesure la puissance de chauffe et l'élévation de température. La puissance et le temps de chauffe (de l'ordre de 120 s) sont ajustés de telle sorte qu'on obtienne une élévation de température suffisante ($> 10^\circ\text{C}$) et un bon ajustement du modèle (1) aux mesures. D'après la documentation du fabricant, la précision de cette sonde est de $\pm 5 \%$ pour des conductivités thermiques comprises entre $0,02$ et $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Blackwell [1] résout l'équation de la chaleur pour un système à deux milieux : la sonde supposée infiniment longue et le matériau. Pour des valeurs de temps suffisantes par rapport aux propriétés du matériau, Carslaw et Jaeger [2] proposent l'expression de l'élévation de température suivante :

$$\Delta T = \frac{q}{4 \pi \lambda} (\ln(t) + cste) \quad (1)$$

La constante regroupe les termes relatifs à la diffusivité du matériau et à la résistance de contact. La détermination de la conductivité thermique se fait par régression linéaire de la courbe $\Delta T=f(\ln(T))$. Le coefficient de corrélation R^2 rend compte de l'ajustement du modèle aux résultats expérimentaux.

3.2. Hot Disk

La technique du hot disk fait partie des méthodes de mesure en régime transitoire [3]. Le hot disk agit à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température résistif. En liaison avec le diamètre de la sonde choisie, une grande plage de conductivité (0,005 à 500 W/m/K) peut être mesurée avec précision, dans un temps court (< 10 min) [4].

La sonde utilisée dans cette étude est à double spirale de 14,6 mm de rayon. Le temps de chauffe est de 120 s et la puissance de 0,06 W.

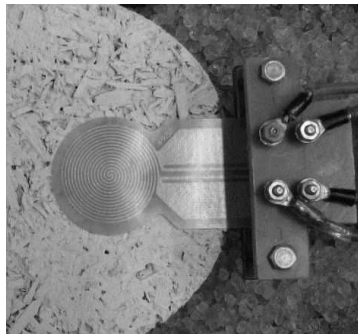


Figure 5 : Hot Disk

3.3. Plaque chaude

Le dispositif expérimental est composé d'une plaque froide et d'une garde arrière (de 13 cm de côté) usinées dans du cuivre massif pour assurer une bonne homogénéité des températures, d'un élément chauffant, d'une isolation entre l'élément chauffant et la garde arrière et d'une garde latérale qui entoure l'échantillon afin de limiter les effets de bord.

La conductivité, mesurée en régime permanent, a pour expression :

$$\lambda = \frac{\Phi_e e}{(T_C - T_F) S} \quad (2)$$

Les échantillons étant stabilisés à l'ambiance du laboratoire ($\approx 23^\circ\text{C}$, 50%), l'écart de température $T_C - T_F$ est de l'ordre de 15 K afin de limiter les migrations d'eau. La température moyenne des échantillons est d'environ 23°C .

4. Résultats et commentaires

Les masses volumiques apparentes (Figure 6) des échantillons utilisés (Tableau 1) sont obtenues par mesures au pied à coulisse et pesées sur une balance à 0,01g.

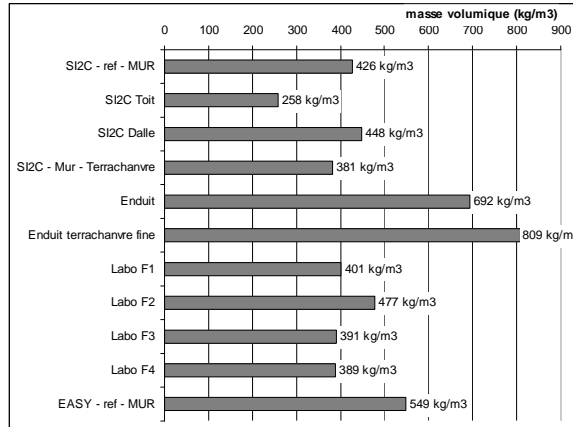


Figure 6 : Masses volumiques des différentes formulations

Les masses volumiques des formulations mur vont de 380 à 500 kg/m³. Les variantes apportées sur le liant (formulations Labo F1, 3 et 4) ne modifient pas significativement la masse volumique. Pour la formulation SI2C Mur, les échantillons réalisés avec du chanvre fibré ont une masse volumique inférieure à celle des échantillons réalisés avec du chanvre "classique". Cependant, ces échantillons n'étant pas mis en oeuvre de la même façon, on ne peut pas attribuer cette variation uniquement au fait d'utiliser du chanvre fibré. Pour les formulations laboratoire, l'utilisation du chanvre fibré (labo F2) conduit à une masse volumique supérieure à la formulation Labo F1. Ces échantillons ont été réalisés de manière rigoureusement similaire (temps de malaxage, compactage...), l'utilisation de chanvre fibré conduirait donc à des matériaux plus denses. La formulation toiture SI2C présente la masse volumique la moins élevée (258 kg/m³) du fait de son faible taux de liant. A l'inverse, la formulation dalle SI2C est la plus chargée en liant ce qui induit une masse volumique élevée (447 kg/m³).

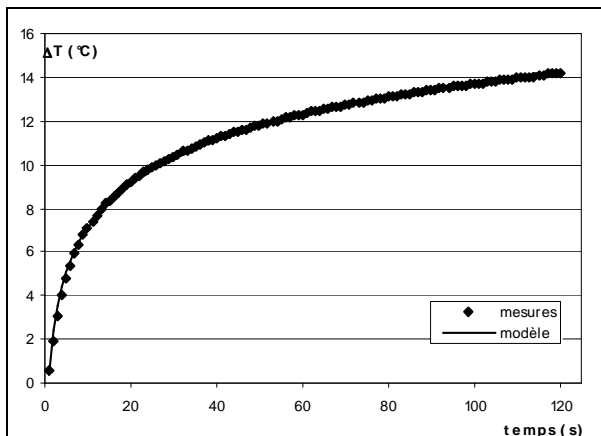


Figure 7 : Exemple de thermogrammes expérimental et modélisé (lors d'un essai sur échantillons SI2C-RTa)

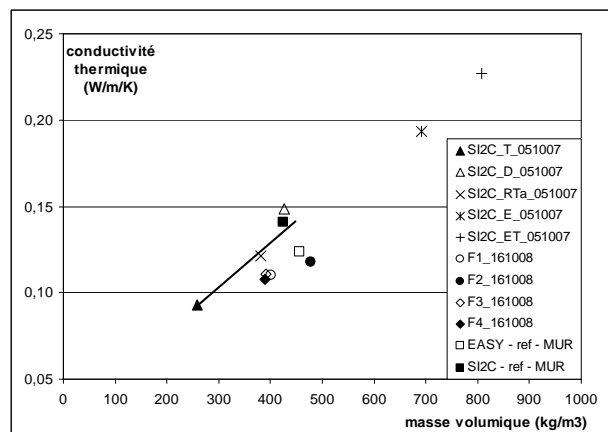


Figure 8 : Conductivités thermiques des différentes formulations à 23°C 50%

Les mesures de conductivité obtenues à la sonde fil présentent chacune un coefficient de corrélation supérieur à 0,99. Les thermogrammes calculés à partir du modèle (1) s'ajustent donc particulièrement bien aux valeurs mesurées (Figure 7). La Figure 8 reporte les valeurs moyennes obtenues à partir de cinq mesures dont le coefficient de variation est inférieur à 4%. Pour des échantillons stabilisés à 50% d'humidité relative, la conductivité thermique des différentes compositions de parois est comprise entre 0,09 W.m⁻¹.K⁻¹ et 0,14 W.m⁻¹.K⁻¹. Les

enduits sont plus conducteurs et présentent une conductivité thermique comprise entre 0,19 et 0,22 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pour un même mode de fabrication, la conductivité thermique dépend essentiellement de la masse volumique du matériau et augmente avec celle-ci (Figure 8). Pour une même masse volumique, le béton de chanvre projeté (SI2C) est plus conducteur que le béton de chanvre moulé (Easy Chanvre ou formulations laboratoire). Les formulations modifiées développées en laboratoire n'ont pas d'influence sur la conductivité thermique du matériau, qui est de l'ordre de 0,11 à 0,12 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. L'effet du chanvre fibré semble moins important que celui de la masse volumique sur la valeur de conductivité obtenue.

Les conductivités thermiques d'échantillons secs de béton projeté de masse volumique égale à $408 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ sont testés à la fois à la sonde fil et au hot disk. On obtient une valeur égale à 0,11 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ avec la première méthode et égale à 0,125 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ avec la seconde. Les résultats sont comparables entre les deux modes de mesure.

La conductivité thermique du béton projeté mesurée à la plaque chaude gardée est en moyenne de 0,11 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une masse volumique de l'ordre de $380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ce qui se rapproche du tracé de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique reporté sur la Figure 8.

5. Conclusion

Les conductivités thermiques obtenues pour le béton de chanvre montrent que ce matériau est adapté pour une utilisation de type isolation répartie. Ainsi, pour un mur vertical donnant sur l'extérieur composé de béton de chanvre standard recouvert de 2 cm d'enduit chanvre chaux côtés intérieur et extérieur, il faudrait une épaisseur de 20,4 cm de béton de chanvre pour satisfaire les exigences minimales de la réglementation thermique 2005 et de 26,5 cm pour atteindre la valeur de référence en zone climatique tempérée (H2). Outre ses propriétés isolantes, le béton de chanvre présente un intérêt en apportant une inertie importante pour la récupération d'apports gratuits.

Références

- [1] Blackwell, *Canadian Journal of Physics*, 31 (1953), 472-479.
- [2] Carslaw et Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford Press (1959).
- [3] Gustafsson, *Review of Scientific Instruments.*, 62-03 (1991), 797-804
- [4] Al-Ajlan, *Applied thermal engineering*, 26(2006), 2184-2191

Remerciements

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