

# Comportement hygrothermique des murs de béton de chanvre

Etienne GOURLAY\*, Laurent ARNAUD

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat – Université de Lyon  
Département Génie Civil et Bâtiment – FRE CNRS 3237  
3, rue Maurice Audin – 69518 Vaulx-en-Velin Cedex  
\*(auteur correspondant : etienne.gourlay@entpe.fr)

**Résumé** – Le béton de chanvre est un matériau très poreux (à plusieurs échelles de pores) qui présente une grande sensibilité à l'eau : la connaissance de son fonctionnement hygrothermique est nécessaire en vue de l'évaluation de ses performances énergétiques. Dans ce travail, le rôle des transferts convectifs dans la régulation thermique d'un mur de béton de chanvre est mesuré expérimentalement. Les transferts de vapeur d'eau et les changements de phase (vapeur-liquide) au sein du matériau permettent d'amortir de manière significative les variations de température extérieure. Enfin, l'influence de l'eau sur la conductivité thermique de différents bétons est modélisée grâce à une approche par homogénéisation autocohérente.

## 1. Introduction

Aujourd'hui, le domaine du bâtiment constitue un enjeu essentiel pour l'environnement. Pour parvenir à construire des bâtiments neufs à énergie positive à l'horizon 2020 comme prévu par le Grenelle de l'environnement ainsi que pour répondre efficacement au challenge crucial de la réhabilitation des logements du bâti existant, l'utilisation d'un matériau de construction ayant un bilan carbone négatif tel que le béton de chanvre apparaît incontournable. En effet, une Analyse du Cycle de Vie (ACV) du matériau a permis d'établir que chaque mètre carré de béton de chanvre mis en œuvre conduit à stocker 35 kg de CO<sub>2</sub> [1]. Toutefois, un tel matériau ne pourrait être utilisé dans le domaine de la construction s'il ne possédait pas les performances techniques nécessaires : l'étude des performances des bétons de chanvre s'impose donc afin d'établir les normes et garanties incontournables pour l'utilisation performante de ce nouveau matériau de construction.

Le béton de chanvre est un matériau obtenu par mélange de particules de chanvre (la chènevotte) et d'un liant. Il est utilisé dans le domaine de la construction comme matériau de remplissage d'une structure porteuse ou sous la forme d'éléments préfabriqués ou enfin comme revêtement de murs.

Ce béton se caractérise par une porosité très importante (plus de 80% en volume) avec plusieurs tailles caractéristiques de pores : des macropores (1cm de diamètre) dus à l'arrangement imparfait des particules végétales dans le mélange, des mésopores (0,1mm à 1mm) au sein des particules végétales et du liant (air piégé), et les micropores interhydrates (inférieurs à 0,01µm) dans la matrice du liant.

Du fait de leur grande porosité, les bétons de chanvre sont très sensibles à l'eau. Le travail porte sur la caractérisation du fonctionnement hygrothermique nécessaire pour l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. L'article présente tout d'abord les matières premières utilisées puis les caractéristiques principales des bétons de chanvre fabriqués. Ensuite, un dispositif expérimental développé au laboratoire permet de mesurer l'impact des transferts d'énergie et d'humidité dans la régulation hygrothermique d'un mur de béton de

chanvre. Enfin, l'influence de l'eau sur la conductivité thermique des matériaux est évaluée par une approche par homogénéisation autocohérente.

## 2. Campagne expérimentale

### 2.1. Fabrication des échantillons

Dans le cadre de ce travail, les bétons de chanvre sont formulés à partir d'une même chènevotte et de trois types de liant. Les granulats végétaux utilisés ont une longueur moyenne de 6,2mm, une largeur moyenne de 1,6mm et une épaisseur moyenne de 0,6mm. Les trois liants sont de nature différente : l'un est à base de chaux aérienne (le béton de chanvre formulé en utilisant ce liant sera noté « Béton 1 » dans la suite de l'étude), un autre est à base de chaux hydraulique (employé pour fabriquer le « Béton 2 ») et le dernier (utilisé pour mettre en œuvre le « Béton 3 ») est à base de ciment.

Les bétons de chanvre sont formulés en suivant les dosages préconisés dans [2] pour la formulation « Mur ». La quantité d'eau de gâchage introduite est adaptée à la mise en œuvre afin d'avoir une même consistance du mélange. Les masses de chanvre, de liant et d'eau introduites pour chaque gâchée sont les suivantes :

	Chènevotte (en kg)	Liant (en kg)	Retardateur de prise (en g)	Eau (en kg)
<b>Béton 1</b>	7,7	15,4	-	24,5
<b>Béton 2</b>	7,7	15,4	-	23,1
<b>Béton 3</b>	7,7	15,4	80	24,5

Tableau 1 : Masses de matière introduites lors de la fabrication des bétons

Pour chaque série, deux éprouvettes sont fabriquées : une éprouvette carrée de 600mm de côté (cotes extérieures) et de 100mm d'épaisseur pour les mesures de transferts hygrothermiques et une éprouvette carrée de 270mm de côté et de 50mm de hauteur pour la mesure de la conductivité thermique sèche des bétons de chanvre.

### 2.2. Réalisation des essais

Les mesures de conductivité thermique sont réalisées sur matériau sec à l'aide d'un banc de conductivité thermique en régime permanent.

Pour les transferts hygrothermiques, l'humidité relative et la température sur l'une des faces de l'échantillon sont simultanément régulées à l'aide d'une enceinte climatique : les parois de béton de chanvre sont ainsi soumises à des gradients de température (T) et d'humidité relative (HR) entre l'intérieur de la chambre climatique et l'ambiance du laboratoire. Les mesures sont réalisées à l'aide de cinq sondes T et HR placées dans l'enceinte (capteur A), dans le laboratoire (capteur E), à la surface de chacune des deux parois de l'échantillon (capteurs B et D) et au milieu du mur (capteur C).

## 3. Impact de la convection sur les transferts hygrothermiques

Une paroi de béton de chanvre a été soumise à des gradients de température et humidité relative. Plusieurs phénomènes se superposent : des transferts liés aux effets conductifs et d'autres liés à la diffusion sous formes vapeur et liquide de l'eau au sein du matériau. Afin

d'identifier le rôle joué par les flux convectifs, nous avons recouvert le mur de « Béton 3 » d'une fine couche étanche de cellophane : ainsi, seuls les transferts de chaleur par conduction s'opèrent au sein du matériau. Les mesures effectuées sont ensuite comparées à celles réalisées sur ce même mur en l'absence du film étanche.

L'échantillon a été soumis à des sollicitations de type créneau, où T et HR restent constantes par paliers de 24 heures. Des conditions extérieures de température et d'humidité relative généralement rencontrées au printemps sont considérées (Paliers 1 et 4 : 20°C, 50%), puis en hiver (Palier 2 : 10°C, 80%) et enfin, en été (Palier 3 : 40°C, 45%).

Les évolutions de la température et de l'humidité relative dans l'enceinte climatique (position A), au milieu de l'échantillon (position C) et dans le laboratoire (position E) sont comparées au cours des essais sur les graphiques suivants :

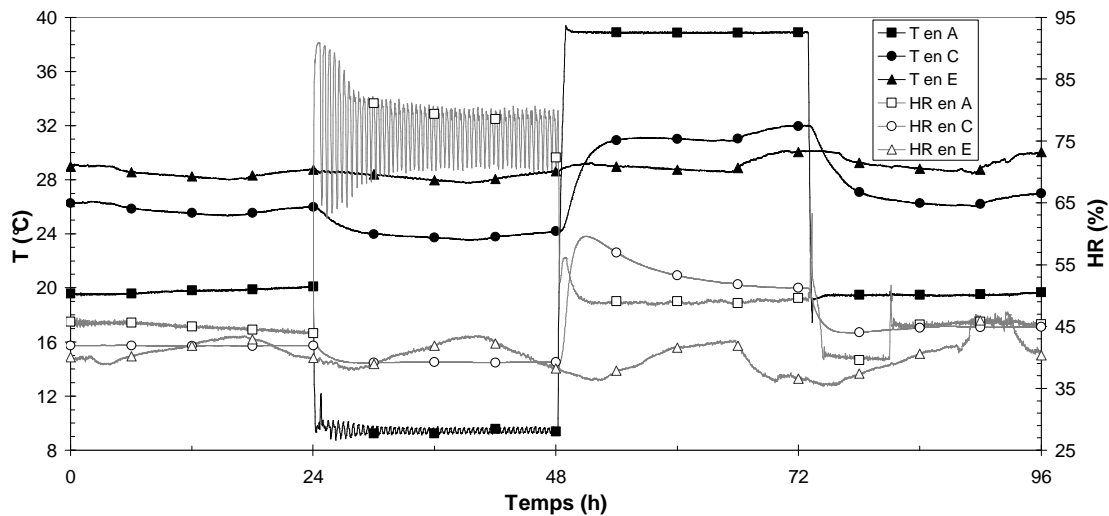


Figure 1 : Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de « Béton 3 » recouvert de cellophane

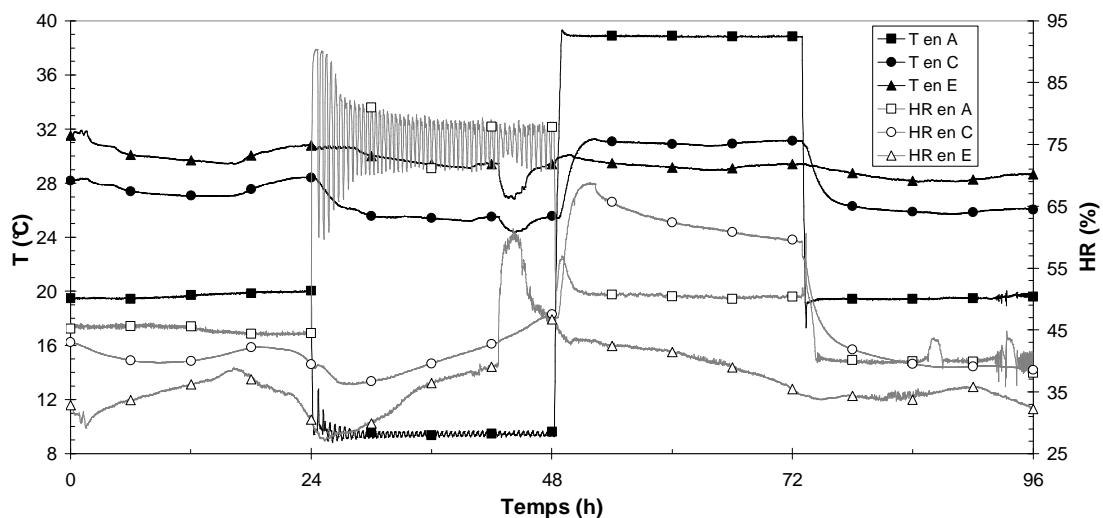


Figure 2 : Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de « Béton 3 » en l'absence de cellophane

En figure 1, on constate que, durant le second palier, l'humidité relative au point C diminue : ceci est lié à la condensation d'une partie de la vapeur d'eau présente dans

l'échantillon. Au début du troisième palier, l'humidité relative en C augmente brutalement avant de décroître puis se stabiliser. La forte hausse de température en A entraîne une vaporisation d'une part de l'eau liquide de l'échantillon : l'humidité relative au milieu du mur augmente alors subitement. Il se crée au sein du mur un gradient d'humidité relative entre la zone « chaude » de l'échantillon où l'eau se vaporise et la zone « froide » où elle ne change pas d'état : la vapeur d'eau migre alors vers la zone « froide », ce qui explique la diminution d'humidité relative observée au milieu du mur. Enfin, au cours du quatrième palier, l'humidité relative en C diminue fortement avant de croître légèrement et se stabiliser. La baisse de température en A est à l'origine de la condensation de vapeur d'eau, ce qui implique une diminution de l'humidité relative en C : il se crée alors un gradient d'humidité relative au sein du mur et la vapeur d'eau migre au sein de l'échantillon, expliquant ainsi l'augmentation d'humidité relative observée au milieu du mur.

En confrontant les graphiques des figures 1 et 2, on constate que l'amplitude de la variation de température mesurée au milieu du mur recouvert de cellophane entre le second et le troisième palier, d'environ 7°C, est plus importante que celle mesurée au milieu de ce mur en l'absence de cellophane (environ 5,5°C). Ceci s'explique par le fait que la cellophane empêche les échanges de vapeur d'eau entre le mur de béton de chanvre et l'extérieur. En effet, durant le second palier, une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'échantillon se condense : le dégagement d'énergie produit par ce changement de phase permet alors de freiner la chute de température dans le mur. En l'absence de cellophane, la diminution de la quantité de vapeur d'eau présente au sein de l'échantillon induite par le phénomène de condensation est compensée par un apport de vapeur d'eau venu de l'extérieur, ce qui favorise la condensation et l'amortissement de la baisse de température. Il en résulte donc que la chute de température au milieu du mur au cours du second palier est moins atténuée lorsque l'échantillon est recouvert de cellophane. Lors du troisième palier, une partie de l'eau liquide contenue dans le béton de chanvre se vaporise : l'absorption d'énergie induite par ce changement de phase permet d'amortir l'augmentation de température dans le mur. Or, durant le second palier, grâce aux apports extérieurs de vapeur d'eau et du fait des changements de phase qui se produisent, le mur non recouvert de cellophane a pu se constituer une plus grande réserve d'eau liquide : pendant le troisième palier, le phénomène de vaporisation est donc plus important dans ce mur, ce qui contribue à un meilleur amortissement de la hausse de température en C. Finalement, l'augmentation de température au milieu de l'échantillon au cours du troisième palier est moins atténuée lorsque le mur est recouvert de cellophane.

#### 4. Modélisation des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Un modèle permettant de prendre en compte le couplage fort entre transfert d'humidité et transfert de chaleur au sein du matériau a été explicité et validé pour un mur de béton de chanvre de même formulation que le « Béton 1 » [3, 4]. Les équations qui régissent le transport couplé de chaleur et d'humidité sont les suivantes :

$$\left( \rho_0 \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right) \right) \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial w}{\partial HR} \cdot \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial HR} \cdot D_w \cdot \frac{\partial HR}{\partial x} + \delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right) \right) \quad (2)$$

$\rho_0$  : masse volumique apparente sèche [kg.m<sup>-3</sup>] ;  $c$  : chaleur massique du matériau [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] ;  
 $w$  : teneur en eau du matériau [kg.m<sup>-3</sup>] ;  $\lambda$  : conductivité thermique du matériau [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] ;  
 $p_{sat}$  : pression de vapeur saturante [Pa] ;  $L_v$  : chaleur latente de changement de phase [J.kg<sup>-1</sup>] ;

$D_w$  : diffusivité hydrique isotherme du matériau [ $m^2.s^{-1}$ ] ;  
 $\delta_p$  : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau [ $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ ].

Les différents coefficients de transfert doivent être déterminés afin que les équations non linéaires puissent être implémentées au sein d'un logiciel de simulation numérique.

On obtient par exemple la conductivité thermique des différents bétons de chanvre fabriqués grâce à un modèle utilisant la méthode d'homogénéisation autocohérente, qui permet de prédire la conductivité thermique des bétons de chanvre sous différentes conditions hygrométriques [5].

Un modèle de double homogénéisation autocohérente est utilisé afin de modifier la conductivité du béton de chanvre en fonction de sa teneur en eau. Dans celui-ci, l'eau liquide contenue dans le béton de chanvre est répartie entre le liant et la chènevotte. La première étape consiste à définir les deux milieux homogénéisés correspondant au liant saturé en eau (milieu LW) et aux particules de chanvre saturées en eau (milieu CW). La deuxième étape permet d'inclure les milieux homogènes LW et CW dans un modèle tricomposite pour obtenir le matériau homogénéisé final :

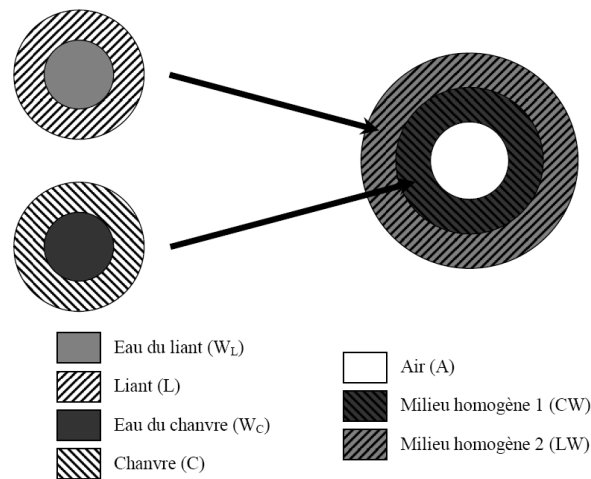


Figure 3 : Modèle de double homogénéisation autocohérente

La conductivité thermique du béton de chanvre humide vaut alors :

$$\frac{\lambda_{BETON}}{\lambda_{LW}} = 1 + \frac{\varepsilon}{\left( \frac{1-\varepsilon}{3} + \frac{3 + \delta \times \left( \frac{\lambda_A}{\lambda_{CW}} - 1 \right)}{3 \times \left( \frac{\lambda_A}{\lambda_{LW}} - 1 \right) - \delta \times \left( \frac{\lambda_A}{\lambda_{CW}} - 1 \right) \times \left( 2 \frac{\lambda_{CW}}{\lambda_{LW}} + 1 \right)} \right)} \quad (3)$$

La conductivité thermique d'une particule de chanvre est de  $0,102 W.m^{-1}.K^{-1}$  d'après [5] et nous avons mesuré expérimentalement les valeurs suivantes :

	$\rho_{\text{béton sec}}$ (en $kg.m^{-3}$ )	$\lambda_{\text{béton sec}}$ (en $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	$\rho_{\text{liant sec}}$ (en $kg.m^{-3}$ )	$\lambda_{\text{liant sec}}$ (en $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
<b>Béton 1</b>	393	0,07	843	0,12
<b>Béton 2</b>	373	0,06	1013	0,15
<b>Béton 3</b>	297	0,06	1166	0,13

Tableau 2 : Masse volumique sèche des bétons et des liants et conductivité thermique sèche des liants

L'évolution de la conductivité thermique des différents bétons de chanvre est alors déterminée en fonction de la teneur en eau massique  $\omega$  (en kg/kg) :

$$\lambda_{BETON\ 1} = 0,078 + 0,129 \times \omega \quad (4)$$

$$\lambda_{BETON\ 2} = 0,076 + 0,124 \times \omega \quad (5)$$

$$\lambda_{BETON\ 3} = 0,059 + 0,087 \times \omega \quad (6)$$

Ces expressions de la conductivité thermique seront utilisées lors de la modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des différents matériaux.

Notons que le profil de conductivité thermique d'un béton de chanvre varie fortement selon la nature du liant utilisé pour le formuler. En effet, le « Béton 3 » présente une conductivité thermique sèche nettement plus faible que celle des bétons à base de chaux. En outre, l'eau modifie de manière moins importante la conductivité thermique du « Béton 3 ».

La masse volumique sèche du « Béton 3 » est significativement inférieure à celle des autres matériaux : celui-ci est donc plus poreux et, par conséquent, sa conductivité thermique sèche est moindre. Notons toutefois que la masse volumique sèche du liant utilisé pour fabriquer le « Béton 3 » est supérieure à celle des liants à base de chaux : il apparaît donc que l'interaction physico-chimique entre le liant et la chènevotte modifie sensiblement la microstructure du béton de chanvre, ce qui impacte la conductivité thermique du matériau.

## 5. Conclusion

Les mesures de transferts hygrothermiques réalisées ont permis de mettre en exergue l'importance du rôle joué par les transferts convectifs dans la régulation thermique d'un mur de béton de chanvre : les apports continus de vapeur d'eau depuis l'extérieur favorisent les changements de phase au sein du matériau et permettent, de ce fait, d'amortir les variations de température dans le mur.

La modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des bétons de chanvre repose sur la détermination d'un certain nombre de coefficients de transferts tels que la conductivité thermique du matériau qui est significativement influencée par la nature du liant utilisé pour le formuler.

## Références

- [1] M.P. Boutin, C. Flamin, S. Quinton, G. Gosse, *Analyse du cycle de vie : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois*, Rapport d'étude INRA Lille (2005).
- [2] Construire en chanvre, *Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en Béton de Chanvre*, SEBTP (2009).
- [3] H.M. Künzle, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*, Thèse de doctorat : Universität Stuttgart (1995).
- [4] D. Samri, *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat : MEGA Université de Lyon/ ENTPE (2008).
- [5] V. Cerezo, *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*, Thèse de doctorat : MEGA INSA de Lyon (2005).