
Etude expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en blocs de béton de chanvre avec ossature en bois.

F. Collet*, S. Prétot, C. Lanos

Université européenne de Bretagne, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Equipe matériaux – Thermo-rhéologie 35704 Rennes Cedex 7

*florence.collet@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ. Cet article traite du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre à ossature bois. Cette paroi est réalisée à partir de blocs préfabriqués. L'étude est réalisée à l'échelle de la paroi grâce à un équipement composé de deux chambres climatiques. La température et l'humidité relative sont mesurées dans la partie courante du mur et au droit de l'ossature. Les capteurs utilisés sont des thermocouples de type K et des sondes sensirion de type SHT75. Les cinétiques de température et de pression de vapeur ainsi que les profils extraits à différents instants sont ainsi identifiés. Ces enregistrements nous permettent de mieux appréhender le comportement hygrothermique du mur et fournissent des jeux de données utilisables pour valider des études numériques.

ABSTRACT. This study deals with hygrothermal behavior of a hempcrete timber-framed wall. This wall is made with precasted blocks. The investigations are performed at wall-scale thanks to a device made of two climatic chambers. The monitoring deals with temperature and relative humidity in thickness of the wall, in the current part and in the front of wood framework. The sensors used are thermocouples type K and sensors sensirion SHT75. Kinetics of temperature and pressure vapor transfer are given and profiles are drawn at different time. These data allow us to learn more about the wall behavior and provide useful data usable for futur.

MOTS-CLÉS : béton de chanvre, transferts hydriques, transferts thermiques

KEY WORDS : hempcrete, hydric transfer, heat transfer

1. Introduction

Dans un contexte de développement durable, les constructions doivent être économes en énergie et avoir recours à des matériaux à faibles impacts environnementaux. A l'issue du Grenelle de l'environnement, des mesures doivent être prises en faveur des matériaux bio-sourcés. Ainsi, l'objectif est d'atteindre 10% de matériaux bio-sourcés dans le bâtiment, hors bois d'œuvre, à l'horizon 2020. Parmi ces matériaux, le béton de chanvre utilisé pour la construction d'enveloppe de bâtiments (Allin, 2005) répond à ces critères.

La caractérisation expérimentale de ce matériau est principalement maîtrisée à l'échelle du matériau d'un point de vue thermique, hydrique et mécanique (Arnaud, 2000), (Collet *et al.*, 2005), (Chamoin *et al.*, 2010). Le béton de chanvre présente une faible conductivité ($\approx 0.1 \text{ W/m/K}$) et une forte perméabilité à la vapeur d'eau ($2.5 \cdot 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$). Les études à l'échelle de la paroi consistent quant à elles principalement en des approches numériques (Evrard *et De Herde*, 2009) (Tran Le *et al.*, 2010).

Cette étude porte sur la caractérisation expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre préfabriqué avec une ossature bois représentative de la mise en œuvre in-situ. Cette paroi est montée au sein d'une enceinte bi-climatique permettant de maîtriser les ambiances en température et en hygrométrie de part et d'autre de la paroi. L'ensemble est instrumenté pour obtenir des cinétiques de température et de pression de vapeur et extraire des profils aux différents instants. Une étude similaire est réalisée sur une paroi en béton de chanvre mis en œuvre par projection [Colinart *et al.*, 2010].

Ces enregistrements permettent de mieux appréhender le comportement de la paroi et peuvent servir de base de données pour la validation d'études numériques.

2. Etude expérimentale : dispositif et consignes

2.1. Enceinte bi-climatique

Le dispositif conçu permet une étude sur une paroi-test à l'échelle 1. Il est composé de deux chambres climatiques adjacentes de 2.35 m de profondeur, 2.78 m de large et 2.40 m de haut. Elles sont régulées en température (T) et en hygrométrie (HR). Les murs et plafond sont composés de panneaux sandwich polyuréthane de 60 mm d'épaisseur ($U = 0,40 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et le sol est en béton peint.

L'une des chambres reproduit le climat intérieur des bâtiments tandis que l'autre simule des conditions climatiques extérieures. Le tableau 1 donne les plages de température et d'hygrométrie pour chaque chambre. La régulation de chaque

paramètre (T et HR) est assurée par des régulateurs universels DR4020 permettant de définir le point de consigne et une bande passante qui régit le fonctionnement des équipements de la chambre (Tableau 1). Chaque régulateur a deux sorties :

- pour la température : chauffage / rafraîchissement,
- pour l'hygrométrie : humidification / déshumidification.

Le chauffage est assuré par des convecteurs, le rafraîchissement et la déshumidification par un groupe frigorifique et l'humidification par des humidificateurs à vapeur.

Tableau 1. Conditions d'utilisation (plages de réglages et bande passante) des deux chambres en température et hygrométrie

	Chambre n°1 (intérieur)		Chambre n°2 (extérieur)	
	Plages	BP	Plages	BP
Température	18 à 27 °C	0,4 °C	-5 à 35 °C	1 °C
Hygrométrie	30 à 60 %	0,6 %	30 à 90 %	1,6 %

La différence de réglage entre les bandes passantes est liée aux puissances des équipements installés dans les chambres.

2.2. Paroi-test

La paroi-test est montée en mur séparatif des deux chambres climatiques. Ses dimensions sont représentatives d'une paroi de bâtiment : 2,30 mètres de long, 0,30 mètres d'épaisseur et 2,10 mètres de hauteur. Ce mur a été monté en place par notre partenaire industriel. Il est composé de blocs préfabriqués de béton de chanvre (**Figure 1**). Ces blocs présentent des réservations pour l'ossature bois ($18 \times 8 \text{ cm}^2$) ainsi que des réservations pour le passage de réseaux ($\varnothing 5 \text{ cm}$). La section de l'ossature est de $15 \times 5 \text{ cm}^2$. L'espace entre les blocs de béton de chanvre et l'ossature est rempli d'un lait de chaux. Ce mur est donc hétérogène de par sa composition : blocs, ossature, joints....

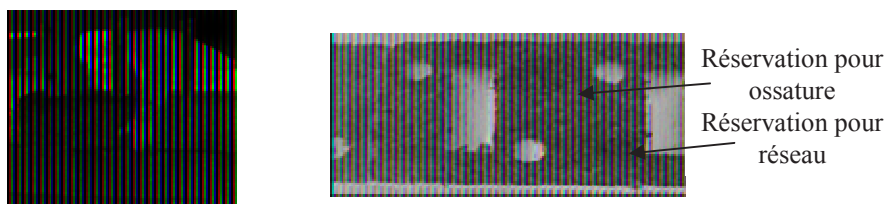


Figure 1. Montage de la paroi-test – vue de dessus d'un bloc

L'étude du comportement hygrothermique est réalisée, dans un premier temps, sur paroi non-enduite, puis, sur paroi enduite. Ce choix a été fait pour identifier la contribution de chaque composant de la paroi à son comportement hygrothermique. Les données présentées ici correspondent aux enregistrements sur le mur nu.

2.3. Métrologie mise en place

La métrologie mise en place a pour objectif de mesurer la réponse du mur aux sollicitations climatologique environnantes (températures et hygrométries ambiantes de part et d'autre du mur). Les capteurs utilisés sont :

- des thermocouples de type K dont la précision est de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, ces thermocouples ont été vérifiés préalablement à leur mise en place à 0°C , 10°C , 20°C et 30°C
- des sondes de température et d'hygrométrie sensirion SHT 75 dont la précision est de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ à 25°C et $\pm 1.8\% \text{HR}$ sur la plage d'hygrométrie 10-90%HR.

A partir de ces mesures, la pression de vapeur est calculée. Le pas de temps d'acquisition est de cinq minutes.

Les mesures portent sur l'air ambiant, sur les surfaces intérieure et extérieure du mur ainsi que sur les profils de température et d'hygrométrie dans le mur. Du fait de l'hétérogénéité du mur, plusieurs profils sont l'objet de mesures (**Figure 2**) :

- en partie centrale des blocs 17 et 20,
- autour des joints entre blocs 25-26 et 11-12
- dans l'alignement des réservations des blocs 8 et 24 (réservation côté intérieur pour le bloc 8 et côté extérieur pour le bloc 24)
- dans l'alignement des poteaux 3 et 6.

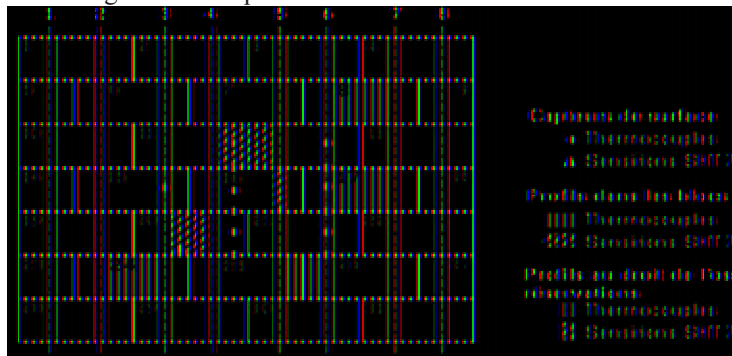


Figure 2. Métrologie de la paroi-test non enduite

2.4. Conditions opératoires - consignes

Quatre mois après la construction de la paroi (durée correspondant au séchage de celle-ci), l'ensemble est stabilisé avec des consignes identiques côté intérieur et côté extérieur : 23°C , 40% HR. Le choix des consignes permet d'abord de dissocier les phénomènes de transport de chaleur et d'humidité avant de les étudier simultanément. Les campagnes d'essai sont menées pour une suite d'ambiances extérieures successives qui ne repassent pas systématiquement par une stabilisation à 23°C , 40% (consignes de l'ambiance intérieure). Les conditions d'essai sont calculées à partir des enregistrements des ambiances lorsque celles-ci sont stabilisées.

3. Résultats

3.1. Stabilisation des ambiances et maintien des consignes

La **Figure 3** présente l'évolution des ambiances intérieure et extérieure à partir d'une stabilisation à 23°C 40% des deux côtés vers une consigne extérieure de 9°C 75%. Les valeurs de consigne sont rapidement atteintes à la fois en température et humidité du fait du peu d'inertie thermique et hydrique de l'enceinte bi-climatique. Elles présentent fréquemment une variation autour de la valeur de consigne supérieure à la bande passante à cause de la puissance des appareils et du mode de régulation en tout ou rien.

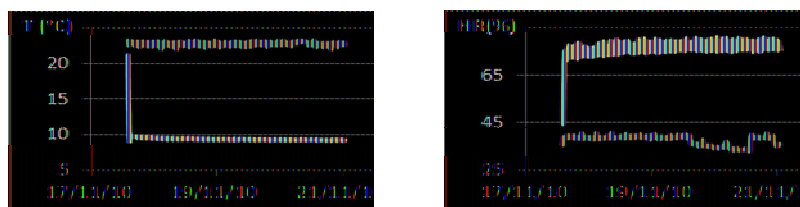


Figure 3. Evolution des ambiances pour des consignes de (23°C, 40%) côté intérieur et (9°C, 75%) côté extérieur

3.2. Comportement hygrothermique en partie courante du mur

3.2.1. Gradient de pression de vapeur et température constante

L'essai est réalisé en conditions isothermes à 23°C, ce qui est validé par les profils relevés aux différents instants (**Figure 5**). La **Figure 4** présente l'évolution des pressions de vapeur au sein du bloc 20 pour une ambiance extérieure passant de 23°C 40 % à 23°C 53 % alors que l'ambiance intérieure est maintenue à 23°C 40%. Ces conditions induisent un flux de vapeur de l'extérieur vers l'intérieur.

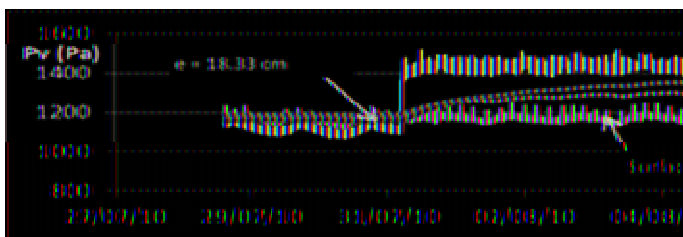


Figure 4. Cinétique de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 23°C 40% à 23°C 53 %.

La cinétique de pression de vapeur présente une évolution progressive au sein du matériau et atteint un régime stationnaire après sept jours quelle que soit la position considérée dans le mur. Le profil de pression de vapeur à l'instant initial est quasi-

constant car les ambiances de part et d'autre de la paroi sont identiques et évolue vers un profil final linéaire. Ainsi, la diffusion de vapeur se produit de façon homogène dans toute l'épaisseur du matériau.

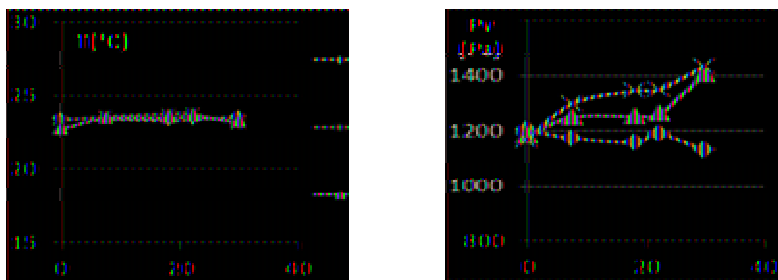


Figure 5. Profils de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 40% à 53 % à différents instants t en jours

3.2.2. Gradient de température et pression de vapeur constante

La Figure 6 présente l'évolution des températures et des pressions de vapeur au sein du bloc 20 pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 %. Du fait de la régulation de la chambre, cette ambiance est la plus proche de la consigne de 30°C 27% qui a pu être obtenue. Par conséquent, la pression de vapeur n'est pas exactement identique de part et d'autre de la paroi test.

La température au sein de la paroi évolue rapidement : 90 % de la variation finale de température est obtenue en 2 jours et demi à 22,36 cm du bord intérieur et le régime permanent est atteint au bout de cinq jours. L'évolution des profils de température au cours du temps est donnée Figure 7 au sein du bloc 20 (sensirion) et du bloc 17 (thermocouples). Les profils mesurés dans les deux blocs sont en bonne adéquation. A l'instant initial, suite à la stabilisation à 15°C, 45% les profils sont linéaires de même qu'à l'instant $t=10$ jours où le nouveau régime permanent est atteint. Entre l'instant initial et l'instant final de cet essai, le sens du flux de chaleur entre les chambres intérieure et extérieure est inversé. L'évolution la plus lente de la température est constatée au centre des blocs où la chaleur se propage dans les deux sens jusqu'à ce que sa température devienne supérieure à la température ambiante intérieure (Figure 7, $t = 0.12$ jour).

La pression de vapeur au sein de la paroi évolue également assez rapidement. En moins d'une heure, un pic de pression de vapeur est observé dans toute l'épaisseur. La pression de vapeur tend ensuite à se stabiliser vers la pression de vapeur correspondant aux ambiances des deux chambres : à 10 jours, la pression de vapeur est quasi-constante dans la paroi. L'évolution des profils est donnée **Figure 7**. Comme pour la température, le profil après la stabilisation initiale est linéaire. Lors du changement de consigne extérieure, où l'ambiance froide et sèche devient chaude et humide, on constate l'apparition d'un pic de pression de vapeur au sein

de la paroi. Les pressions de vapeur observées sont supérieures aux pressions de vapeur des chambres, ainsi il est probable qu'au phénomène de diffusion de vapeur dû au changement de consigne s'ajoute un phénomène d'évaporation-condensation de l'eau adsorbée au sein du matériau.

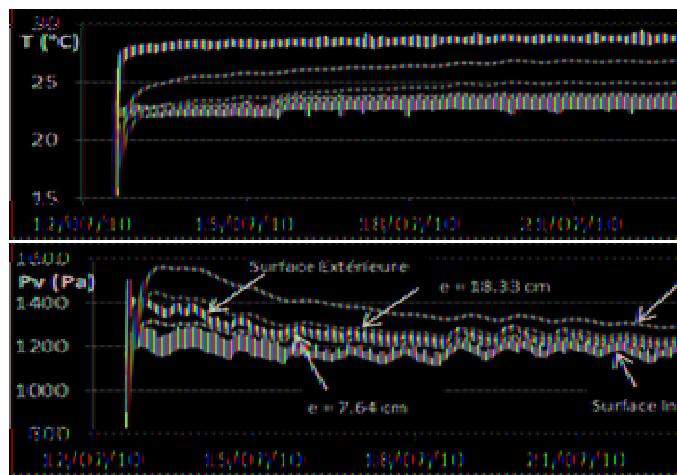


Figure 6. Cinétique de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 % au sein du bloc 20.

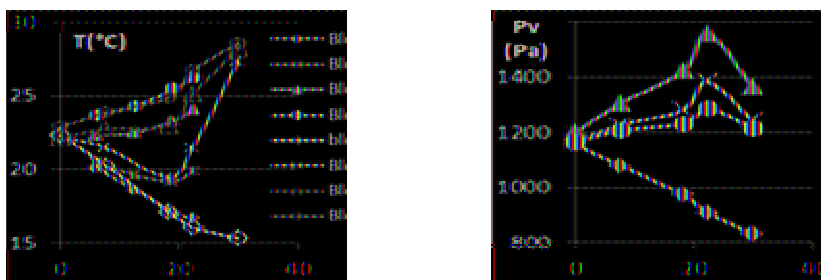


Figure 7. Profils de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 % à différents instants t en jours

3.2.3. Gradients simultanés de pression de vapeur et de température.

La **Figure 8** présente l'évolution des températures et des pressions de vapeur au sein du bloc 20 pour une ambiance extérieure passant à 9,5°C 77% après une stabilisation à 23°C 40% pour les ambiances intérieures et extérieures. Dans ce cas, on génère simultanément un flux de chaleur et un flux d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur.

La pression de vapeur (**Figure 8**) chute rapidement à l'intérieur du matériau du côté de la chambre extérieure puis croit vers sa valeur de stabilisation. Le même phénomène se reproduit avec un déphasage dans l'épaisseur du matériau et des constantes de temps plus grandes pour la chute et la remontée en pression de vapeur.

Les pressions de vapeur atteignent des valeurs inférieures aux valeurs de stabilisation, ce qui se semble traduire des phénomènes de condensation-évaporation

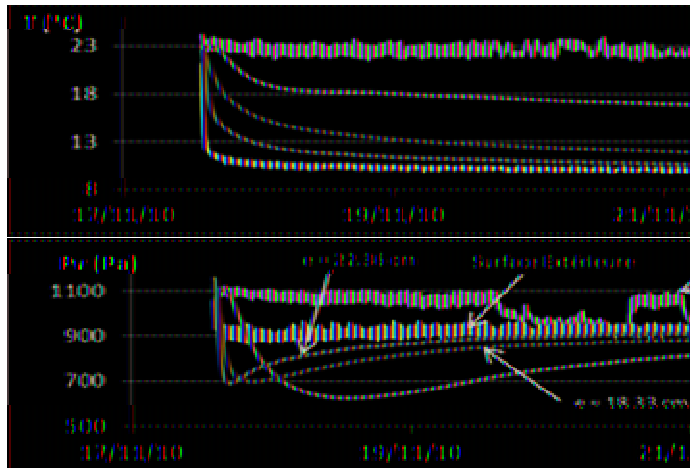


Figure 8. Cinétique de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant à 9,5°C 77% après une stabilisation à 23°C 40%.

3.3. Comportement hygrothermique au droit de l'ossature

La **Figure 9** présente l'évolution des températures et des pressions de vapeur pour différentes profondeurs en partie courante et au contact du poteau 5 (côté intérieur et côté extérieur) pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 %. Les profils de température et de pression de vapeur issus de ces cinétiques sont donnés **Figure 10**.

Les cinétiques mesurées au contact du poteau évoluent de la même façon que celles mesurées au sein de la partie courante aussi bien pour la température que pour la pression de vapeur. Ainsi, le poteau ne semble pas générer de déphasage dans la propagation du flux de chaleur et du flux d'humidité au sein de la paroi.

Les profils de température mesurés au contact du poteau se superposent à ceux mesurés en partie courante. Le poteau ne perturbe donc pas notablement les conditions de transferts et de stockage de chaleur au sein de la paroi. L'ossature ne constitue donc pas de pont thermique du fait, notamment, que le béton de chanvre et le bois ont des conductivités thermiques similaires.

De même, les profils de pression de vapeur suivent la même tendance et l'influence du poteau sur le de transfert et le stockage de l'humidité au sein de la paroi est limitée. A l'instant initial, la pression de vapeur est toutefois différente au contact du poteau, témoignant d'un état d'équilibre différent pouvant être dû à des capacités de sorption différentes. N'ayant pas de mesure au sein du poteau, cette

hypothèse reste à vérifier. Il semble donc que les évolutions dans l'épaisseur de la paroi soient gouvernées notamment par celles au sein du béton de chanvre (qui enveloppe l'ossature bois).

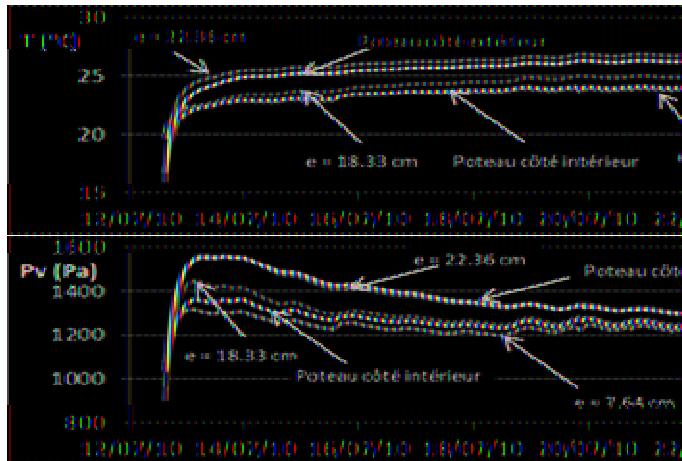


Figure 9. Cinétique de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 % en partie courante et au contact du poteau 5.

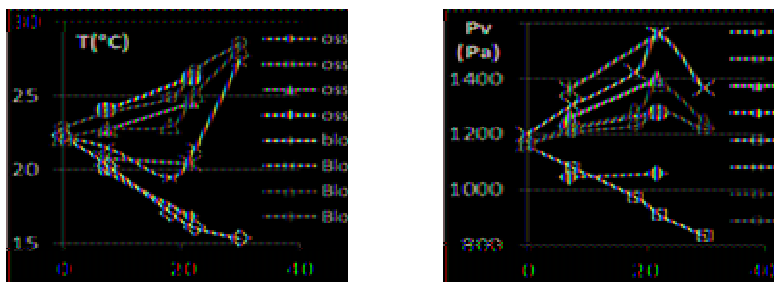


Figure 10. Profils de température et de pression de vapeur pour une ambiance extérieure passant de 15°C 45% à 28°C 32 %, à différents instants t en jours, en partie courante et au contact du poteau 5.

4. Conclusion

Le dispositif mis en place pour réaliser cette étude est validé. Il permet de réaliser des études à l'échelle de la paroi. Le temps de réponse des ambiances est rapide lors du changement de consigne. Toutefois le mode de régulation en tout ou rien et la puissance des équipements installés conduisent à d'immanquables fluctuations autour des valeurs de consigne.

Les essais menés montrent des temps de réponse de la paroi courts aussi bien en température qu'en humidité. Selon les conditions initiales et la consigne finale différents phénomènes peuvent apparaître en partie courante du mur :

- l'étude d'un cas isotherme avec gradient de pression de vapeur permet de montrer une diffusion de vapeur homogène dans toute l'épaisseur
- lors d'un refroidissement d'ambiance à pression de vapeur constante, on constate des variations importantes de pression de vapeur probablement liées à l'apparition de phénomènes d'évaporation-condensation

L'analyse des résultats au droit de l'ossature montre qu'elle ne perturbe pas le comportement hygrothermique de la paroi. En outre, elle ne constitue pas un pont thermique du fait des conductivités thermiques équivalentes du bois et du béton de chanvre.

La suite de l'étude porte sur la paroi enduite pour avoir un comportement plus représentatif d'une paroi réelle. Toutes ces données peuvent être utilisées pour valider des résultats issus de codes numériques.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet « BETONCHANVRE » et la région Bretagne pour le financement du projet « ECOMATX ».

5. Bibliographie

- Allin, S. 2005. *Building with hemp*, Seed press Ed.
- Arnaud L., «Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools : experimental and theoretical approaches », *3 Symp Int of bioresource hemp*, 2000.
- Chamoïn J., Collet F., Pretot S., «Perméabilité à l'humidité de matériaux à base de chaux et de chanvre », *XXVIIIèmes rencontres universitaires de Génie Civil*, 2010, La Bourboule
- Colinart T., Glouannec P., Chauvelon P., Le Bideau P., Collet F., Lanos C., «Etude et modélisation du comportement thermo-hydrique d'une paroi en béton de chanvre », *Conférence Francophone, IBPSA France*, Novembre 2010.
- Collet, F. Pretot, S. Chamoïn, J. Lanos C., «Hydric characterization of sprayed hempcrete », *4th International Building Physics Conference*, Istanbul. 2009.
- Evrard A., De Herde A., «Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies, *Journal of building physics*, 2009
- Tran Le A.D., Maalouf C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F., «Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope», *Energy and Buildings*, vol. 42, p. 1797-1806, 2010.