

OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET THERMIQUES DES BÉTONS DE CHANVRE - IMPACT DES MATIÈRES PREMIÈRES

Etienne GOURLAY, Laurent ARNAUD

École 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 – France
etienne.gourlay@entpe.fr, laurent.arnaud@entpe.fr

1. INTRODUCTION

L'utilisation de particules végétales comme granulats de matériaux de construction se justifie aujourd'hui pour au moins deux raisons majeures :

- La préservation des ressources naturelles telles que les granulats minéraux dont les conditions de prélèvement et d'exploitation deviennent de plus en plus difficiles.
- La nécessité de concevoir des matériaux de construction avec de plus faibles impacts environnementaux, notamment du point de vue de l'empreinte carbone.

Depuis le début des années 90, un nouveau matériau de construction composé de particules de chanvre (la chènevotte) et d'un liant est développé. Il permet de réaliser des éco-constructions de bâtiments, comme matériau de remplissage d'une structure porteuse. Le béton de chanvre se caractérise par une empreinte écologique très réduite et même positive : son analyse de cycle de vie (Boutin *et al.*, 2005) montre qu'il permet de stocker près de 35 kg de CO₂ par mètre carré de mur de 25 cm d'épaisseur réalisé.

En outre, les diverses recherches menées (Arnaud *et al.*, 2001), (Cérézo, 2005), (Elfordy *et al.*, 2008), (Samri, 2008), (De Bruijn *et al.*, 2009), (Arnaud *et al.*, 2011) montrent que les mélanges qui sont obtenus à partir des matières premières (eau, liant, chènevotte) en quantités variables couvrent une large gamme de performances, permettant ainsi de définir des formulations type adaptées à diverses applications : mur, dalle, isolation de toiture ou enduit décoratif à caractère isolant (Hustache *et al.*, 2008). Le béton de chanvre présente une porosité très importante (plus de 80% en volume) avec plusieurs tailles caractéristiques de pores (Collet *et al.*, 2008) :

- des macropores (1 cm de diamètre) dus à l'arrangement imparfait des particules végétales dans le mélange,
- des mésopores (0,1 mm à 1 mm) au sein des particules végétales et du liant (air piégé),
- les micropores interhydrates (inférieurs à 0,01 µm) dans la matrice du liant.

Cette porosité élevée est à la base de performances physiques à la fois originales et de haut niveau (Arnaud *et al.*,

2001), (Cérézo, 2005), (Gourlay *et al.*, 2011). En effet, les bétons de chanvre se caractérisent par :

- leur légèreté : masse volumique sèche apparente de l'ordre de 400 kg/m^3 pour un mélange de type « Mur »,
- une ductilité mécanique importante : déformations en compression supérieures à 10% possibles et absence de rupture fragile,
- un niveau d'isolation thermique élevé : conductivité thermique sèche d'environ $0,08 \text{ W/m.K}$,
- un niveau d'isolation phonique remarquable : absorption acoustique pouvant être supérieure à 80% (Arnaud *et al.*, 2006), (Glé *et al.*, 2011).

Pour constituer des bétons de chanvre, on dispose aujourd'hui de différents types de liants (hydrauliques ou aériens) et de diverses qualités de chènevotte dont les caractéristiques physiques (microstructurales notamment) varient grandement. Dans cette étude, l'impact de trois chènevottes différentes et de trois sortes de liants (un liant à base de chaux aérienne, un liant à base de chaux hydraulique et un liant à base de clinker) sur les propriétés mécaniques et thermiques du matériau est mesuré. L'influence des transferts d'énergie et d'humidité dans la régulation hygrothermique d'un mur de béton de chanvre est également évaluée.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1. Matières premières utilisées

Les bétons de chanvre testés ont été mis en œuvre en utilisant trois sortes de liants et trois chènevottes distinctes.

Le liant A est un liant préformulé à base de chaux aérienne éteinte (75%), de liant hydraulique (15%) et de liant pouzzolanique (10%). Le liant B contient uniquement de la chaux hydraulique et le liant C est un ciment à forte teneur en clinker (CPA - CEM I). Les masses volumiques apparentes des différents liants sont présentées dans le tableau 1.

Les trois chènevottes employées ont des origines géographiques variées et sont issues de modes de récolte et de transformation du chanvre très différents. Les masses volumiques apparentes des particules de chanvre en vrac sont données dans le tableau 2.

La chènevotte 1 est constituée de particules végétales plus courtes que celles des autres chènevottes : sa porosité interparticulaire est donc plus faible et sa masse volumique apparente est plus élevée.

Les distributions granulométriques des chènevottes 2 et 3 sont sensiblement identiques. En revanche, la chènevotte 2 contient une plus grande quantité de fibres : sa masse volumique apparente est donc plus faible.

2.2. Formulation et mise en œuvre des bétons

Les éprouvettes ont été fabriquées en utilisant une bétonnière à tambour rotatif et pales fixes d'une capacité de 120 litres selon un mode opératoire conforme à celui décrit dans (RP2C, 2006).

Les bétons de chanvre réalisés ont été formulés en suivant les dosages préconisés dans (RP2C, 2006) pour la formulation « Mur ». La quantité d'eau de gâchage introduite a été modulée lors de la mise en œuvre afin de conserver la même rhéologie initiale pour tous les mélanges. Les masses de chènevotte, de liant et d'eau introduites pour réaliser chaque formulation sont présentées dans le tableau 3. Notons que le nom donné à chaque mélange fait référence aux matières premières utilisées : par exemple, le béton « C-2 » a été fabriqué à partir du liant C et de la chènevotte 2.

Pour chaque mélange, 9 échantillons cylindriques de 160 mm de diamètre et de 320 mm de hauteur, 3 éprouvettes carrées de 270 mm de côté et de 50 mm de hauteur et un mur mesurant 600 mm de côté et 100 mm d'épaisseur ont été fabriqués. Ces éprouvettes ont été mises en œuvre en couches de 50 mm d'épaisseur sous une contrainte de compactage de 0,05 MPa puis conservées avec leur moule dans une chambre climatique régulée à 20°C et 50% d'humidité relative jusqu'à la date de l'essai (RP2C, 2006).

2.3. Mesures réalisées

2.3.1. Essais de compression simple

Avant d'être testées, les éprouvettes cylindriques fabriquées ont été démoulées puis placées durant 48 heures dans une étuve à 50°C afin d'éviter que l'eau de gâchage ne perturbe les résultats des essais mécaniques.

Les essais de compression simple ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique équipée d'un capteur de force de 50 kN et pilotée en déplacement à une vitesse de 5 mm/min.

2.3.2. Détermination de l'effusivité et de la conductivité thermique sèche

Les éprouvettes carrées ont été placées durant 24 heures dans une étuve à 50°C. Ensuite, l'effusivité thermique

Liant	A	B	C
Masse volumique apparente (kg/m^3)	650	700	1700

Tableau 1. Masses volumiques apparentes des liants

Chènevotte	1	2	3
Masse volumique apparente (kg/m^3)	105	90	94

Tableau 2. Masses volumiques apparentes des chènevottes

Béton	% Masse			% Volume		
	Chènevotte	Liant	Eau	Chènevotte	Liant	Eau
A-1	17,0	34,1	48,9	61,6	19,9	18,5
A-2	18,2	36,4	45,4	66,6	18,4	15,0
A-3	18,6	37,1	44,3	66,1	19,1	14,8
B-1	17,2	34,5	48,3	62,7	18,8	18,5
B-2	18,0	36,0	46,0	67,2	17,3	15,5
B-3	18,8	37,7	43,5	67,3	18,1	14,6
C-1	16,8	33,6	49,6	69,8	8,6	21,6
C-2	19,3	38,6	42,1	76,8	8,1	15,1
C-3	19,8	39,6	40,6	76,7	8,5	14,8

Tableau 3. Composition massique et volumique des bétons frais constitués des couples Liant - Chènevotte

sèche du matériau a été déterminée en utilisant une méthode « plan chaud » et la conductivité thermique sèche a été mesurée à l'aide d'une méthode « fil chaud ».

2.3.3. Mesures de transferts hygrothermiques

Un dispositif expérimental original a été développé au sein du laboratoire (Gourlay, 2009). L'humidité relative et la température sont simultanément régulées sur l'une des faces de l'échantillon à l'aide d'une enceinte climatique : les parois de béton de chanvre sont ainsi soumises à des gradients de température et d'humidité relative entre l'intérieur de la chambre climatique et l'ambiance du laboratoire. Les mesures sont réalisées à l'aide de cinq sondes de température et d'humidité relative 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). L'analyse des mesures effectuées est essentiellement basée sur les variations de ce dernier capteur.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Essais de compression simple

Pour chaque formulation réalisée, 3 éprouvettes cylindriques ont été testées en compression simple à 28, à 60 et à 90 jours. Les courbes contrainte - déformation des bétons de chanvre formulés à partir du liant A sont représentées en figure 1. Les valeurs moyennes de résistance en compression σ_{\max} et de module d'Young E obtenues pour chaque mélange lors des essais de compression simple réalisés sont données dans le tableau 4.

En figure 1, on constate que le comportement mécanique du matériau dépend grandement de son âge : la cinétique de prise des bétons de chanvre est relativement lente. Au jeune âge, les bétons de chanvre ont un comportement très souple et fortement ductile (caractérisé par la présence

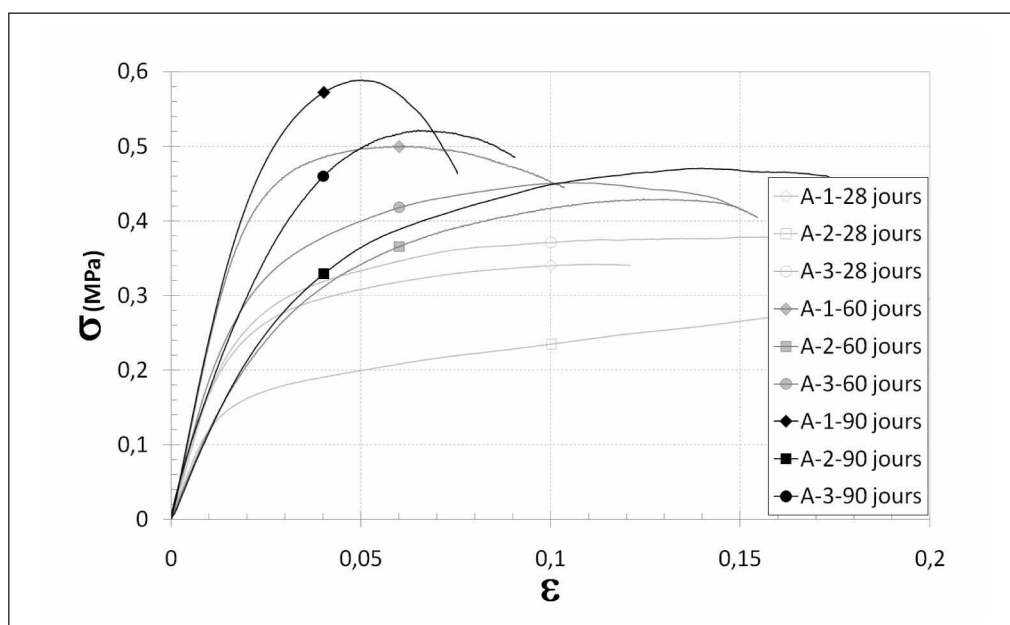


Figure 1. Courbes contrainte - déformation à diverses échéances des bétons de chanvre mis en œuvre en utilisant le liant A

	28 jours		60 jours		90 jours	
Béton	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)
A-1	0,34	17,9	0,51	28,0	0,59	24,8
A-2	0,24	13,2	0,42	11,9	0,42	13,4
A-3	0,37	17,6	0,42	22,4	0,52	18,8
B-1	0,09	3,4	0,08	1,3	0,08	1,4
B-2	0,07	1,7	0,09	1,0	0,10	1,2
B-3	0,11	1,6	0,10	1,3	0,11	1,4
C-1	0,06	1,8	0,09	2,4	0,11	1,3
C-2	0,09	4,9	0,16	1,9	0,19	2,3
C-3	0,09	4,4	0,21	2,6	0,25	3,1

Tableau 4. Résistance en compression et module d'Young moyens mesurés pour chaque mélange

d'un long plateau plastique sur la courbe). Les hydrates de liant ne forment pas encore un réseau connecté : le comportement du béton est donc proche de celui des particules de chanvre fortement déformables. Avec le temps, les hydrates qui se forment se connectent entre eux et créent progressivement un réseau continu dans lequel les efforts sont transmis. Les caractéristiques du liant deviennent peu à peu prépondérantes dans le mélange : les bétons de chanvre reprennent alors des efforts de plus en plus importants et leur comportement est de moins en moins ductile. Sur la figure 1, on remarque également que le béton fabriqué à partir de la chènevotte 2 et, dans une moindre mesure, celui formulé à partir de la chènevotte 3 sont plus ductiles que celui fabriqué en utilisant la chènevotte 1. Ces différences de déformabilité en compression peuvent très vraisemblablement être corrélées aux caractéristiques morphologiques des chènevottes (quantité de fibres, taille des particules de chanvre, ...).

Les bétons formulés à partir du liant A possèdent de très bonnes propriétés mécaniques au regard des valeurs de référence ($\sigma_{\max} = 0,2$ MPa et $E = 15$ MPa) pour la formulation « Mur » (RP2C, 2006). En revanche, les échantillons fabriqués en utilisant les liants B et C présentent de très faibles propriétés mécaniques, caractéristiques d'une prise très partielle du liant. Ce résultat est peu surprenant pour les bétons à base de liant B dans la mesure où les éprouvettes ont été conservées dans un environnement peu humide (50% HR) : de telles conditions ralentissent très fortement la prise des liants hydrauliques. La prise partielle du liant C, à forte teneur en clinker, est plus inattendue : elle s'explique par des interactions physico-chimiques entre les produits de dissolution de la chènevotte et le liant, qui altèrent la prise du béton de chanvre.

3.2. Détermination de l'effusivité et de la conductivité thermique sèche

Les effusivités et les conductivités thermiques sèches mesurées sont présentées dans le tableau 5.

L'effusivité thermique caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus sa

valeur est grande plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur (internes ou solaires) sans que sa température intérieure n'augmente notablement. L'effusivité thermique d'un matériau est donnée par la formule : $e = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{1/2}$ où λ est la conductivité thermique, ρ est la masse volumique et c est la capacité thermique massique du matériau.

Béton de chanvre	e_{sec} ($\text{W.s}^{1/2}.\text{K}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	λ_{sec} ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
A-1	153	0,099
A-2	155	0,102
A-3	161	0,107
B-1	128	0,079
B-2	123	0,080
B-3	153	0,101
C-1	123	0,073
C-2	126	0,083
C-3	128	0,084

Tableau 5. Effusivité et conductivité thermique sèche de chaque béton de chanvre

Les bétons de chanvre formulés à partir du liant A ont des propriétés thermiques sèches plus élevées que celles des autres matériaux : ceci peut vraisemblablement être relié aux propriétés thermiques sèches du liant pur.

Les grandeurs thermophysiques mesurées seront implémentées dans un modèle numérique de transferts couplés de chaleur et d'humidité permettant de modéliser les transferts hygrothermiques au sein d'un mur de béton de chanvre (Samri, 2008).

3.3. Mesures de transferts hygrothermiques

Une paroi de béton de chanvre a été soumise à des gradients de température et d'humidité relative. Plusieurs phénomènes se superposent : des transferts liés aux effets

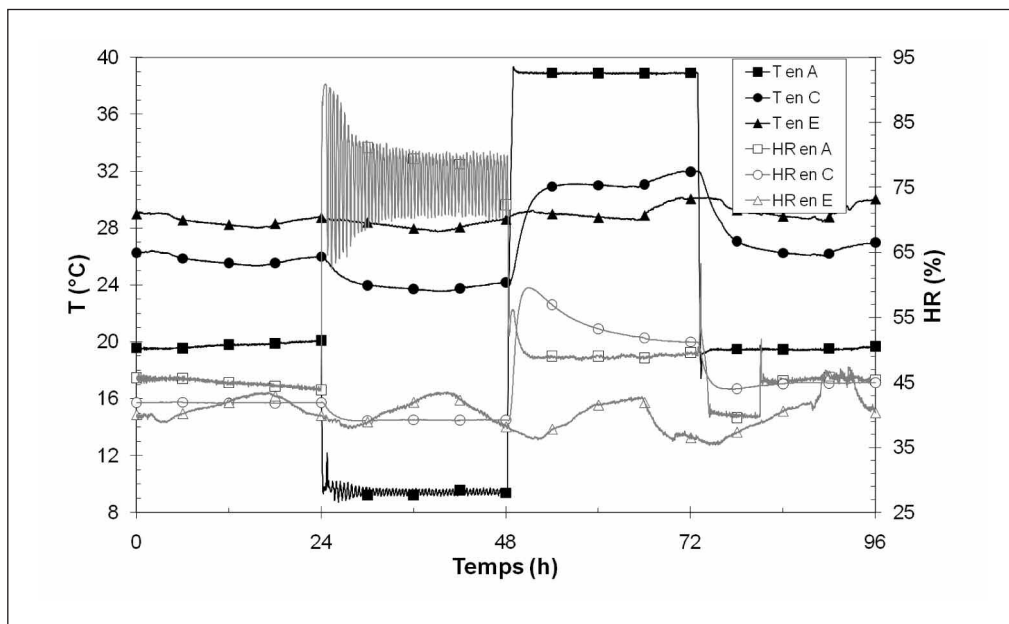


Figure 2. Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de béton de chanvre « C-1 » recouvert de cellophane

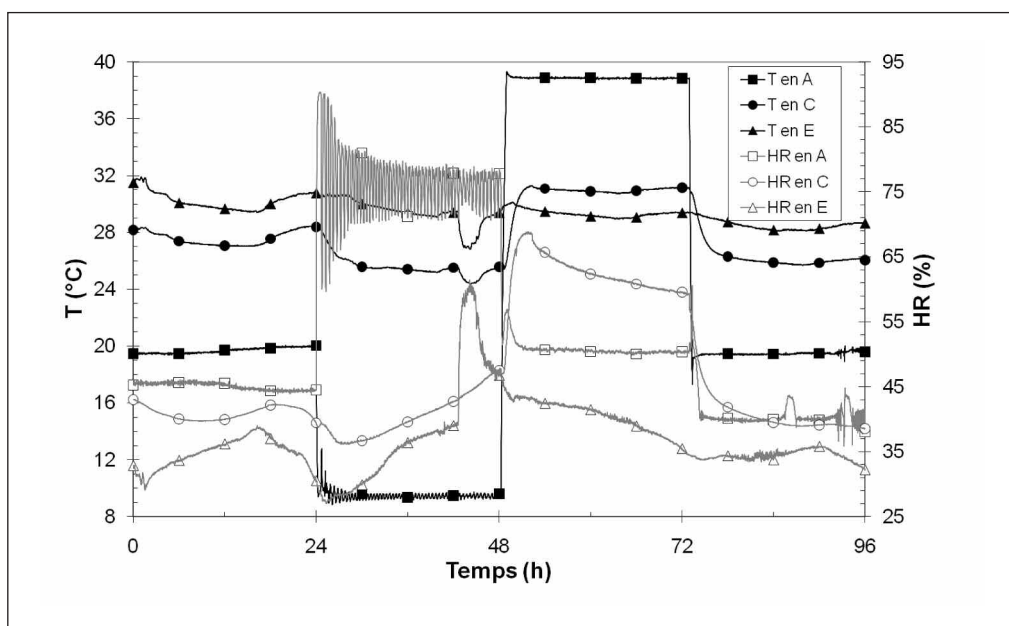


Figure 3. Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de béton de chanvre « C-1 » en l'absence de cellophane

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, les parois d'un mur formulé à partir du liant C et de la chènevotte 1 ont été recouvertes d'une couche très fine et 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 et dans des conditions proches en l'absence du film étanche. L'échantillon a été soumis à des sollicitations de type créneau, où la température T et l'humidité relative HR restent constantes par paliers de 24 heures. Des conditions extérieures généralement rencontrées au printemps sont considérées (Paliers 1 et 4 : 20°C, 50% HR), puis en hiver (Palier 2 : 10°C, 80% HR) et enfin, en été (Palier 3 : 40°C, 45% HR).

Les évolutions de T et HR 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 figures 2 et 3.

En figure 2, on observe que, durant le second palier, l'humidité relative en 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 au point 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 contenue dans 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 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 2 et 3, on constate que l'amplitude de la variation de température mesurée au milieu du mur recouvert de cellophane entre le deuxième et le troisième palier, d'environ 7°C, est plus importante que celle mesurée au milieu de ce même 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 et l'extérieur. En effet, durant le deuxième 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 l'arrivée de vapeur d'eau venue 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 deuxième 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 deuxième 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.

En conclusion, le béton de chanvre se comporte comme un Matériau à Changement de Phase naturel. Des travaux en cours visent à étudier l'influence de divers types de liants et de différentes chènevottes sur les transferts hygrothermiques au sein du matériau.

4. CONCLUSION

Le béton de chanvre constitué de particules végétales (la chènevotte) et d'un liant répond à une demande forte de matériaux de construction à la fois « environnementale » et techniquement performants. Il permet en effet de stocker du CO₂ en valorisant un sous-produit issu de la culture du chanvre et donc renouvelable et facilement recyclable. L'impact de trois sortes de liants et de trois chènevottes différentes sur les propriétés mécaniques et thermiques du béton de chanvre est mesuré dans cet article.

Les éprouvettes fabriquées à partir d'un liant à base de chaux aérienne éteinte possèdent de très bonnes propriétés mécaniques tandis que les bétons de chanvre formulés en utilisant un liant à base de chaux hydraulique et un ciment à forte teneur en clinker présentent de très faibles

propriétés mécaniques, caractéristiques d'une prise partielle du liant : des interactions physico-chimiques entre le liant et la chènevotte altèrent la prise du béton de chanvre. En outre, la déformabilité en compression du matériau dépend de la chènevotte utilisée : ceci peut être corrélé aux caractéristiques morphologiques des chènevottes (quantité de fibres, taille des particules de chanvre, ...).

Enfin, les mesures de transferts hygrothermiques réalisées montrent l'importance majeure des 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 (condensation et vaporisation) au sein du matériau et permettent, de ce fait, d'amortir sensiblement les variations de température dans le mur. Du fait de ces transferts, le béton de chanvre se comporte comme un Matériau à Changement de Phase naturel.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud L., Cérézo V., Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre, Rapport d'étude, ENTPE-DGCB, 2001.
- Arnaud L., Cérézo V., Samri D., « Global approach for the design of building material containing lime and vegetable particles », *Proceedings of 6th International Symposium on Cement and Concrete*, Xi'an, China, 19-22 septembre 2006, p. 1261-1265.
- Arnaud L., Gourlay E., « Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 28, n° 1, 2012, p. 50-56.
- Boutin M.P., Flamin C., Quinton S., Gosse G., Analyse du cycle de vie de : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature en bois, Rapport d'étude, INRA Lille, 2005.
- Cérézo V., 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.
- Collet F., Bart M., Serres L., Miriel J., « Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials », *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 6, 2008, p. 1271-1280.
- Commission RP2C, Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre, Rapport technique, Commission « Règles Professionnelles Construction Chanvre » RP2C, 2006.
- De Bruijn P.B., Jeppsson K.H., Sandin K., Nilsson C., « Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres », *Biosystems Engineering*, vol. 103, 2009, p. 474-479.
- Elfordy S., Lucas F., Tancrét F., Scudeller Y., Goudet L., « Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process », *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 10, 2008, p. 2116-2123.
- Glé P., Gourdon E., Arnaud L., « Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity », *Applied Acoustics*, vol. 72, n° 5, 2011, p. 249-259.

Gourlay E., De la chènevotte au béton de chanvre, optimisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques, Mémoire de Master Recherche, MEGA ENTPE, 2009.

Gourlay E., Glé P., Arnaud L., Gourdon E., « Propriétés multi-physiques des bétons de chanvre », *Matériaux & Techniques*, vol. 99, 2011, p. 625-631.

Hustache Y., Arnaud L., *Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*, 2008.

Samri D., Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat, MEGA ENTPE, 2008.