

Des matières premières au béton de chanvre : optimisation des propriétés thermiques et mécaniques

E. GOURLAY, L. 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*

Résumé :

Le béton de chanvre est un matériau multifonctionnel à faible impact environnemental utilisé dans le domaine de la construction. Du fait de son importante porosité (environ 80% en volume), il présente un comportement mécanique "atypique" et ses propriétés thermiques et acoustiques sont particulièrement intéressantes. Il est ainsi possible de dimensionner ce matériau selon l'utilisation visée dans le bâtiment. Dans cette étude, l'impact des matières premières (liant et particules de chanvre) sur les propriétés mécaniques et thermiques du matériau est évalué. Il est montré que des interactions physico-chimiques entre les particules végétales et le liant peuvent altérer la prise mécanique du béton de chanvre. En outre, la déformabilité en compression du matériau peut être corrélée aux caractéristiques morphologiques des particules de chanvre. Enfin, les transferts de vapeur d'eau et les changements de phase (condensation et vaporisation) au sein du matériau permettent d'amortir significativement les variations de température extérieure.

Abstract :

Hemp concrete is a multifunctional ecological material used in buildings. Due to its high porosity (about 80% in volume), it presents an "atypical" mechanical behavior and its thermal and acoustical properties are particularly interesting. It is thus possible to design this material according to the required use in the building. This paper focuses on the impact of raw materials (binder and hemp particles) on the mechanical and thermal properties of the material. It is shown that physico-chemical interactions between the vegetable particles and the binder may disrupt the mechanical setting of the hemp concrete. Moreover, the material compressive strain may be correlated with the morphological characteristics of the hemp particles. Finally, the water vapor transfers and the phase changes (condensation and vaporization) within the material allow cushioning significantly the changes in outside temperature.

Mots clefs : béton de chanvre, mécanique, transferts hygrothermiques

1 Introduction

L'utilisation de particules végétales comme granulats de matériaux de construction apparaît incontournable aujourd'hui si l'on souhaite préserver les ressources naturelles et concevoir des matériaux avec de plus faibles impacts environnementaux.

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 montre qu'il permet de stocker environ 35 kg de CO₂ par mètre carré de mur réalisé en 25 cm d'épaisseur [1].

En outre, les recherches menées [2, 3, 4, 5, 6] 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 [7].

Le béton de chanvre présente une porosité très importante (plus de 80% en volume) avec plusieurs tailles caractéristiques de pores [8] : 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), et 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 [2, 3]. 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") mais également par une ductilité mécanique importante (déformations en compression supérieures à 10% possibles) et des niveaux d'isolation thermique et phonique remarquables (conductivité thermique sèche de 0,08 $\text{W}/(\text{m.K})$ et absorption acoustique pouvant être supérieure à 80% [9, 10]).

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 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 chènevottes distinctes et trois sortes de liants. Les chènevottes 1, 2 et 3 ont des origines géographiques variées et sont issues de modes de récolte et de transformation du chanvre très différents. 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 constitué de clinker.

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 [11].

Les bétons de chanvre réalisés ont été formulés en suivant les dosages préconisés dans [11] 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 1. Notons que le nom donné à chaque mélange fait référence aux matières premières utilisées : par exemple, le béton "B-1" a été fabriqué à partir du liant B et de la chènevotte 1.

TAB. 1 – Composition massique et volumique des bétons frais constitués des couples Liant - Chènevotte

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

Pour chaque mélange, 9 échantillons cylindriques de 160 mm de diamètre et de 320 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 [11].

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 5 mm/min.

2.3.2 Mesures de transferts hygrothermiques

Un dispositif expérimental original a été développé au sein du laboratoire [12]. 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 discussion

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 fabriqués 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 2.

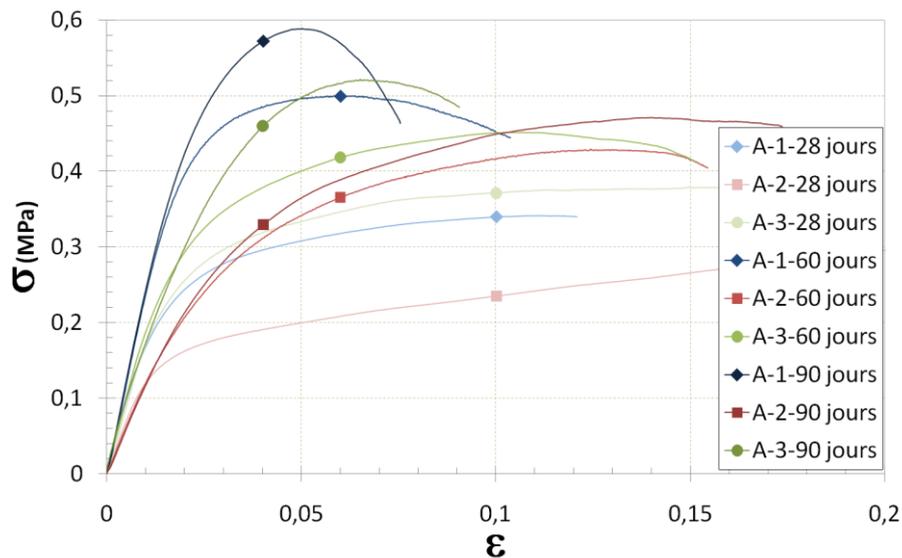


FIG. 1 – Courbes contrainte - déformation à diverses échéances des bétons de chanvre mis en œuvre en utilisant le liant A

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 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, ...).

TAB. 2 – Résistance en compression et module d'Young moyens mesurés pour chaque mélange

Béton	28 jours		60 jours		90 jours	
	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

Les bétons de chanvre 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" [11]. 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) : ces conditions ralentissent très fortement la prise des liants hydrauliques. La prise partielle du liant C, à base de 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 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 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 constate que, durant le second palier, HR 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, HR en C augmente brutalement avant de décroître puis se stabiliser. La forte hausse de T de 7 °C en A entraîne une vaporisation d'une part de l'eau liquide contenue dans l'échantillon : HR au milieu du mur augmente alors subitement. Il se crée au sein du mur un gradient de HR 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 de HR observée au milieu du mur. Enfin, au cours du quatrième palier, HR en C diminue avant de croître légèrement et se stabiliser. La baisse de T en A est à l'origine de la condensation de vapeur d'eau, ce qui implique une diminution de HR en C : il se crée alors un gradient de HR au sein du mur et la vapeur d'eau migre au sein de l'échantillon, expliquant ainsi l'augmentation de HR observée au milieu du mur.

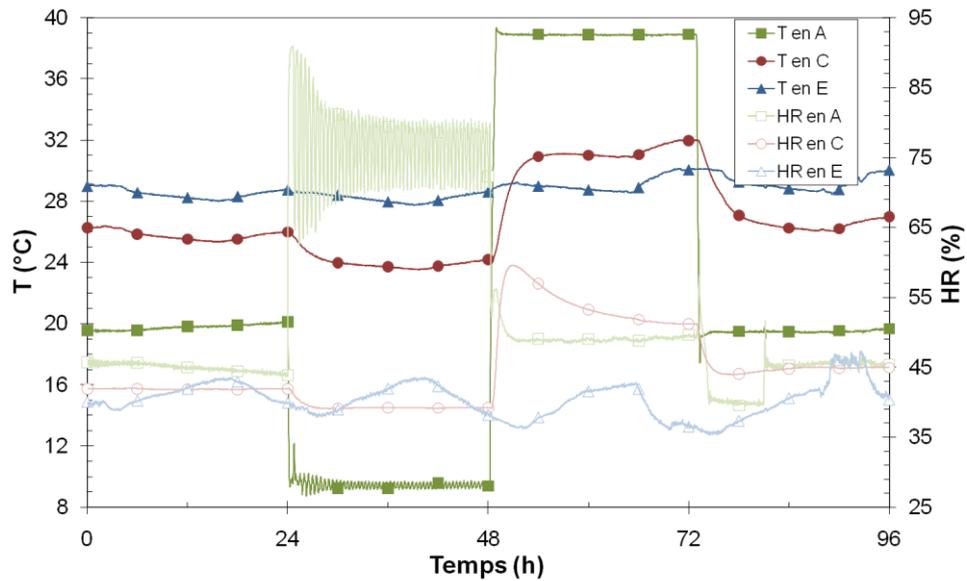


FIG. 2 – Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de béton de chanvre "C-1" recouvert de cellophane

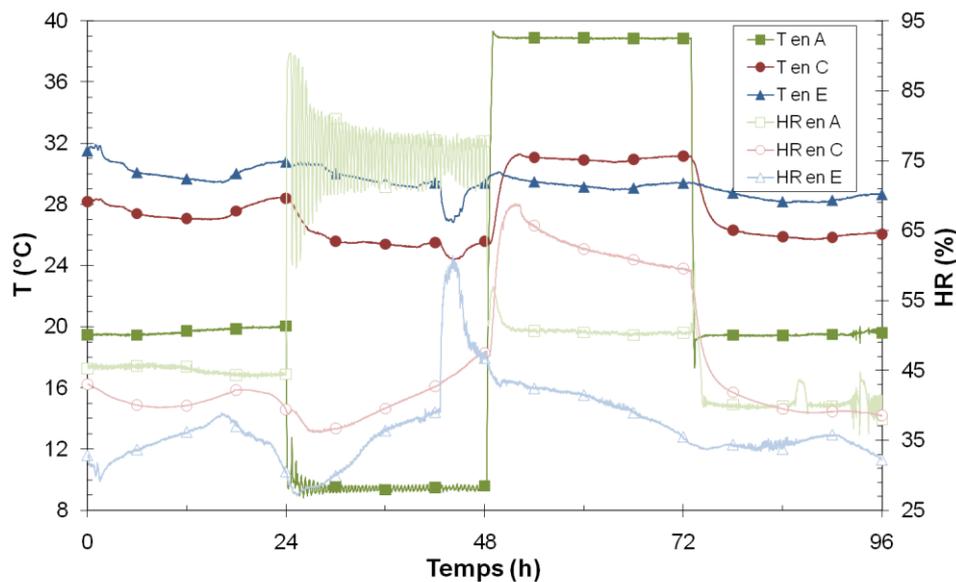


FIG. 3 – Evolution de la température et de l'humidité relative en A, en C et en E au cours du temps pour le mur de béton de chanvre "C-1" en l'absence de cellophane

En confrontant les graphiques des figures 2 et 3, on constate que l'amplitude de la variation de T 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 $5,5^{\circ}\text{C}$) car cette dernière 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 T 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 venue de l'extérieur, ce qui favorise la condensation et l'amortissement de la baisse de T . Il en résulte donc que la chute de T 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 T 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 T en C. Finalement, l'augmentation de T 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 "environnementalement" 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 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.

Références

- [1] Boutin, M.P., Flamin, C., Quinton, S. et Gosse, G. (2005) *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.
- [2] Arnaud, L. et Cerezo, V. (2001) Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre, Rapport d'étude, ENTPE-DGCB.
- [3] Cerezo, V. (2005) *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.
- [4] Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y. et Goudet, L. (2008) "Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemcrete") manufactured by a projection process", *Construction and Building Materials*, 22(10): 2116-2123.
- [5] Samri, D. (2008) *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat, MEGA ENTPE.
- [6] De Bruijn, P.B., Jeppsson, K.H., Sandin, K., et Nilsson, C. (2009) "Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres", *Biosystems Engineering*, 103: 474-479.
- [7] Hustache, Y. et Arnaud, L. (2008) Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre.
- [8] Collet, F., Bart, M., Serres, L. et Miriel, J. (2008) "Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials", *Construction and Building Materials*, 22(6): 1271-1280.
- [9] Arnaud, L., Cerezo, V. et Samri, D. (2006) "Global approach for the design of building material containing lime and vegetable particles", dans : The 6th International Symposium on Cement and Concrete, Xi'an, China, 1261-1265.
- [10] Glé, P., Gourdon, E. et Arnaud, L. (2011) "Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity", *Applied Acoustics*, 72(5): 249-259.
- [11] Commission RP2C. (2006) *Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre*, Rapport technique, Commission "Règles Professionnelles Construction Chanvre" RP2C.
- [12] Gourlay, E. (2009) *De la chènevotte au béton de chanvre, optimisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques*, Mémoire de Master Recherche, MEGA ENTPE.