



**HAL**  
open science

## **Béton de chanvre : Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique.**

Pierre Tronet, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, Christophe Baley

### ► To cite this version:

Pierre Tronet, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, Christophe Baley. Béton de chanvre : Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique.. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.161. <hal-00597501>

**HAL Id: hal-00597501**

**<https://hal.science/hal-00597501v1>**

Submitted on 1 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## **Béton de chanvre : Effet du dosage en granulat sur les propriétés thermique et mécanique.**

### ***Hemp concrete: Effect of granular proportion on the mechanical and thermal properties.***

**Pierre Tronet, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte et Christophe Baley**

LIMATB (Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne) – Université Bretagne Sud – Université Européenne de Bretagne  
Rue Saint Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex  
e-mail : [pierre.tronet@univ-ubs.fr](mailto:pierre.tronet@univ-ubs.fr)

#### **Résumé**

La préfabrication d'éléments de construction composés de béton de chanvre, mélange chaux-chanvre, montre que leur compactage à l'état frais conduit à une amélioration notable de leur qualité à l'état sec : meilleures caractéristiques mécaniques et qualités de parement. Cette étude explore des domaines où le granulat est très fortement compacté, jusqu'à  $500 \text{ kg/m}^3$ , pour évaluer la faisabilité de réaliser des éléments porteurs. Afin de mieux maîtriser ce processus de mise en œuvre, une matrice cylindrique instrumentée a été utilisée pour étudier le comportement mécanique et les caractéristiques de différentes formulations.

La teneur en eau du mélange, ressort comme un paramètre déterminant, puisqu'elle tend à augmenter le coefficient de frottement du matériau et par voie de conséquence, réduire l'efficacité du compactage.

Ce procédé permet de substituer efficacement du liant (chaux + eau), qui présente l'inconvénient d'être la phase la plus conductrice thermiquement et d'avoir le plus d'impact sur l'environnement, par des granulats végétaux compressibles. En effet, de meilleures résistances mécaniques et des conductivités thermiques semblables sont obtenues, in fine sur des matériaux matures, avec moins de liant par volume unitaire et des dosages en granulats plus importants. Un tel procédé par compactage s'avère donc pertinent sur un plan qualitatif et environnemental.

#### **Abstract**

Pre-casting of building elements made of hemp concrete, mix of lime and hemp, show that compression during casting lead to significant improvements: better mechanical characteristics and finishability. This study dealt with high range of bio based granular compaction, up to  $500 \text{ kg/m}^3$ , in order that we should know if pre-casting load bearing element could be made using this process. In order to control the casting process, an equipped piston-cylinder densification apparatus has been used to study the mechanical behavior and characteristics of many fresh mixes.

The water content of mix seems to be a key parameter since it could increase the wall friction and consequently reduce the compaction efficiency.

This process allows to effectively substitute binder paste (lime + water), that disadvantage the material since it is the most thermal conductive phase and it has the larger ecological footprint, for bio-based compressible granular. Indeed, higher mechanical strengths while similar thermal conductivities are finally got with mature material containing lower binder content and higher granular content per unit volume. Such process appears a relevant way to get better qualitative and eco-friendly material.

**Mots Clés :** Chanvre, béton, compactage, conductivité thermique, résistance mécanique

**Keywords :** Hemp, concrete, compaction, thermal conductivity, mechanical strength

## 1. Introduction :

On estime que le secteur du bâtiment est actuellement à l'origine de 24% des émissions de CO<sub>2</sub> et de 44% de la consommation d'énergie en France [1]. Les nouvelles normes d'isolation des bâtiments tendent à faire diminuer la part d'énergie consacrée au chauffage, qui représente près des deux tiers de la consommation d'énergie et la majeure partie des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur en France. Cependant, dans ce contexte, la dépense énergétique consacrée à l'élaboration et à la mise en œuvre des matériaux de construction ne cesse d'augmenter. En considérant une durée d'utilisation de 50 ans, l'énergie consacrée uniquement à l'élaboration et à la mise en œuvre des matériaux représente près de 50% de l'énergie totale consacrée au bâtiment dans le cas d'une conception de type « Bâtiment Basse Consommation » (BBC) pour une dépense énergétique annuelle de 50 kWh/m<sup>2</sup> et plus de 75% dans le cas d'une conception de type « Passivhaus de Darmstadt » pour une dépense énergétique annuelle de 15 kWh/m<sup>2</sup> [2]. Il est à noter que dans le cadre d'une étude complète, il conviendrait également de considérer le traitement ou le recyclage éventuel de ces matériaux en fin de vie pour évaluer correctement l'impact environnemental des constructions.

À la vue de ces chiffres, et du contexte auquel le secteur du bâtiment doit faire face d'ici 2050 [3], de nouveaux matériaux à base d'agro-ressources s'imposent comme une alternative réaliste. Peu exploités jusqu'à présent, leur utilisation suscite de nombreuses questions et leur potentiel d'amélioration en terme de performance (mécanique, thermique, coût et fiabilité) semble important.

L'utilisation de granulats d'origine végétale tels que le chanvre et le lin bénéficie de deux principaux avantages. Premièrement ces matériaux, largement disponibles à faible coût, participent à une économie de proximité offrant de nouveaux débouchés aux produits issus du milieu agricole. De plus, ils permettent de développer des matériaux et des technologies en considérant et en réduisant les impacts sur l'environnement [4].

Face à une demande toujours croissante, de nouvelles technologies de mise en œuvre de ces matériaux alternatifs apparaissent. Pour les bétons de chanvre, mélanges constitués de chaux et de chanvre, des techniques de projection in situ [5] ou de préfabrication d'éléments par compression uniaxiale [6] ont fait l'objet d'études particulières. Ce dernier procédé, s'inspire de la préfabrication de blocs de construction traditionnels, briques ou parpaings, et permet l'obtention d'un produit fini calibré et fiable. Cependant un effort doit être fait sur l'étude du compactage du matériau à la mise en œuvre.

La réalisation de blocs de béton de chanvre par compression à des pressions relativement élevées (5-7 MPa), s'avère être une piste intéressante, autant sur un plan écologique, que d'un point de vue thermique et mécanique. On sait que les matériaux constitués de liants hydrauliques sont d'autant plus résistants que leur porosité est faible. Le compactage à la mise en œuvre permet donc d'obtenir des blocs plus résistants tout en diminuant le dosage en liant pour une même résistance équivalente. D'un point de vue environnemental, il est préférable de diminuer la quantité en liants hydrauliques, dont l'impact environnemental est plus important, au profit de la chènevotte, qui joue globalement le rôle de puits de carbone [7]. D'autre part, l'hétérogénéité de densité au sein de l'éprouvette, due au frottement à la paroi, varie avec la contrainte de compression. Plus la contrainte moyenne imposée à l'éprouvette est grande, plus sa densité est uniforme.

Globalement, il en résulte une légère hausse de la conductivité thermique du matériau. Toutefois, Nguyen et al [8] ont démontré que le compactage engendre des gains de résistance en compression qui sont nettement plus importants au regard de l'augmentation de la conductivité thermique du matériau. Pour autant, il peut être intéressant de trouver la

contrainte de compression susceptible de limiter à la fois l'hétérogénéité des éléments, tout en donnant le meilleur compromis entre résistances mécanique et thermique.

## 2. Expériences

Dans une récente étude sur la compression du béton de chanvre [6], un dosage en granulat qui variait entre  $89 \text{ kg/m}^3$  et  $222 \text{ kg/m}^3$ , a montré que l'augmentation du dosage en béton de chanvre améliorerait ses propriétés mécaniques. Dans cette logique, le dosage en chènevotte lors de nos essais a été fixé à  $500 \text{ kg/m}^3$ .

La chènevotte utilisée tout au long de nos essais provient des chanvrières de l'Aube, et a été étuvée à  $65^\circ\text{C}$  durant 48h, dans le but de garantir un faible taux d'humidité.

Afin de dissocier les différentes contributions des constituants formant le béton de chanvre lors du compactage à l'état frais, une série de trois essais a été entreprise. Chacun de ces essais ont été réitérés trois fois, afin d'obtenir une bonne représentabilité des phénomènes mis en jeu. De plus, dans un souci de lisibilité, l'ensemble des courbes a été moyenné sur trois essais, et les cycles de décharge-recharge n'ont pas été reportés.

Dans le but de poser les bases de notre étude, nous avons tout d'abord compacté, 785 g de chènevotte seule a une densité de  $500 \text{ kg/m}^3$ . Dans un second temps de la chènevotte a été mélangée via un malaxeur (Hobart Legacy HL200) à un litre d'eau en vitesse lente durant 5 min. Le volume d'eau introduit au cours du malaxage correspond au volume d'espace vide qui subsiste en fin de compression pour une densité relative en chènevotte de  $500 \text{ kg/m}^3$ . Toutefois lors du compactage une quantité significative de cette eau est expulsée du cylindre de compression. Il a donc été nécessaire d'étuver après compression la chènevotte afin de déterminer la quantité d'eau restante, qui a été mesurée à 50% en masse. En dernier lieu, dans l'objectif de n'avoir aucune évacuation de pâte de liant durant la phase de compression, il a été mélangé à de la chènevotte un volume de 0,4 litre de pâte de liant, soit  $255 \text{ L/m}^3$ . Il en découle que pour une masse volumique relative en chènevotte de  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $149 \text{ kg/m}^3$  d'eau et  $271 \text{ kg/m}^3$  de liant ont été introduits au mélange. Cela représente en outre un rapport *Eau/liant* de 0,55 et *Liant/Granulat* de 0,54.

Les formulations comportant du liant ainsi formées restent confinées 6 jours dans le moule, temps nécessaire à la relaxation des contraintes, avant d'en être extraites. À l'issue du démoulage, les éprouvettes sont stockées en atmosphère contrôlée à  $20\pm 2^\circ\text{C}$  et à  $75\pm 5\%$  HR. Pour chaque formulation cinq éprouvettes ont été réalisées : quatre pour les essais de compression mécanique, deux à 28 jours, deux à 90 jours, et une pour la mesure de la conductivité thermique.

Parallèlement à cette étude, trois formulations de béton de chanvre ont été réalisées, au moyen de moules en PVC. L'objectif de ces essais est de déterminer l'influence du dosage en granulats sur les propriétés mécaniques et thermiques. Pour ce faire, seul le rapport *Liant/Granulat* est modifié, tandis que la densité initiale et le rapport *Eau/Liant* sont constants (voir Tableau 1).

Formulation	Granulat ( $\text{kg/m}^3$ )	Liant ( $\text{kg/m}^3$ )	Eau ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$ initial ( $\text{kg/m}^3$ )	L/G	E/L
1	215,3	387,5	213,2	816	1,8	0,55
2	257,4	360,4	198,2	816	1,4	0,55
3	320	320	176	816	1	0,55
4	500	271	149	940	0,54	0,55

Tab. 1: Compositions réalisées selon les dosages ( $\text{kg/m}^3$ ) et les rapports massiques considérés.

## 2.1 Caractérisation des mécanismes de compression.

La densification de la biomasse est communément considérée comme une des étapes essentielles pour sa conversion et son utilisation dans le cadre des technologies respectueuses de l'environnement [9]. Cette densification apporte entre autres l'avantage d'une gestion, d'un stockage et d'un transport plus efficace. Dans notre cas, cela permet la réduction et le contrôle de la porosité des empilements granulaires réalisés et par conséquent la maîtrise des propriétés mécaniques des matériaux ainsi obtenus.

Les récentes études sur la compression de la biomasse [10-11-12], et notamment sur la paille de blé, et la canne de maïs, montrent l'importance de l'humidité présente dans la fibre, de la taille et de la forme des particules sur son compactage.

Cependant, les mécanismes mis en jeu lors de la compression (e.g. frottement et coefficient de transmission) restent encore très peu évoqués.

### 2.1.1 Dispositif expérimental.

L'optimisation de la formulation et du procédé de mise en œuvre par compactage à l'état frais, s'est faite au moyen d'une matrice de compression instrumentée. Ce dispositif, a été élaboré au sein du laboratoire, suivant le modèle des matrices instrumentées en mécanique des poudres [13-14]. Elle a été dimensionnée de façon à comprimer un empilement granulaire d'une hauteur initiale de 80 cm, à une hauteur de 20 cm en fin de compression.

L'ensemble présenté Fig. 1 (a), est composé de pistons en partie supérieure et inférieure, ainsi que de quatre jauges de déformation. Ces jauges ont la particularité d'avoir été collées sur des méplats (Fig. 1 (b)), usinés sur la paroi externe du cylindre de compression. Cela permet une meilleure sensibilité des jauges à la contrainte radiale locale s'exerçant sur la paroi interne.

La matrice est solidarisée au plateau d'une presse électromécanique (Zwick/Roell HB-T, 250 kN). Des capteurs de force et de déplacement permettent de mesurer les efforts des poinçons supérieur et inférieur, ainsi que la hauteur de l'échantillon au cours de la compression.

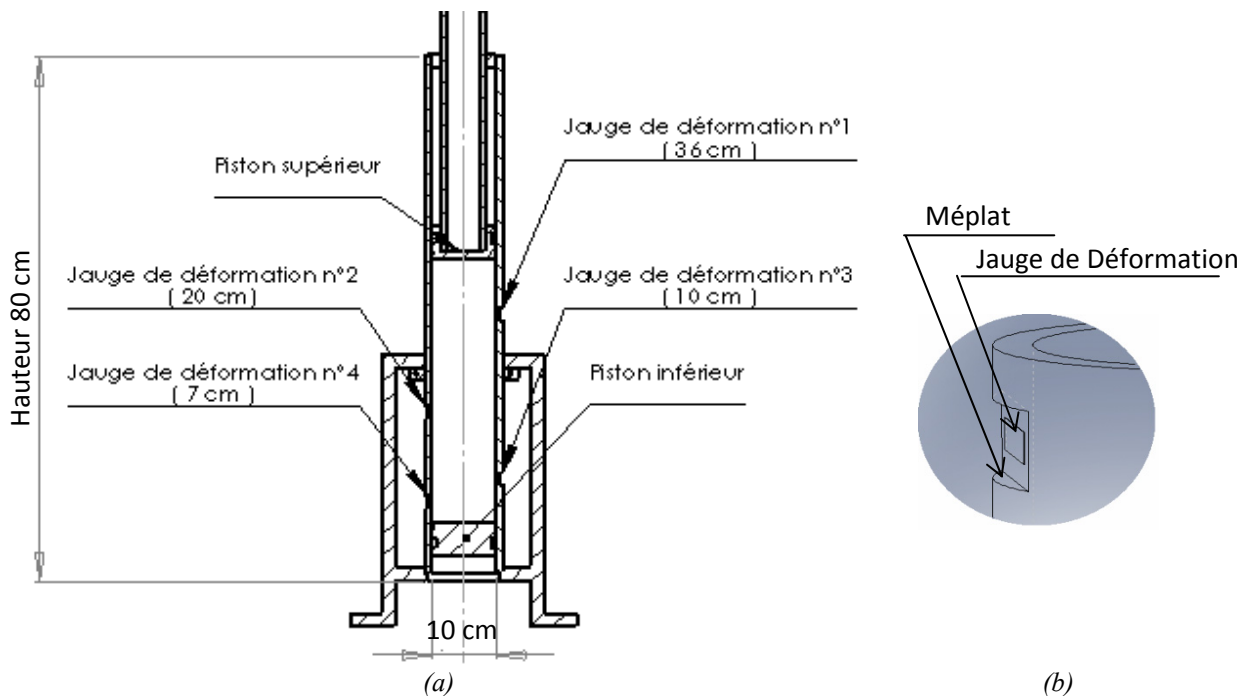


Fig. 1 (a) Dispositif expérimental de compression en matrice, (b) schéma d'une jauge collée sur la paroi externe

### 2.1.2 Principe de l'essai ;

L'objectif de notre étude, est de mesurer le comportement à la compression de l'empilement granulaire pour un état de contrainte donné. Cet état de contrainte est estimé en calculant un état de contrainte moyen à partir des données mesurées de contraintes axiales et radiales. Tandis que le comportement mécanique à la compression nous est donné par le coefficient de frottement  $\mu_f$  à la paroi et le coefficient de transmission radiale  $\alpha$ . Ces deux derniers indicateurs reposent sur différentes hypothèses, énoncées ci-dessous :

H1. Le gradient de contrainte radiale  $\sigma_r$  est négligeable sur le rayon d'une tranche.

H2. La contrainte radiale  $\sigma_r$  est proportionnelle à la contrainte axiale  $\sigma_z$  ce qui se traduit par :

$$\sigma_r = \alpha \sigma_z \quad (\text{Eq. 1})$$

où  $\alpha$  est appelé coefficient de transmission des contraintes, supposé indépendant de la hauteur  $z$  pour une densité moyenne.

H3. La contrainte tangentielle  $\tau_z$  est proportionnelle à la contrainte radiale  $\sigma_r$ , et suit une loi de type coulomb :

$$\tau_z = \mu_f \sigma_r \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $\mu_f$  est le coefficient de frottement entre la poudre et la paroi de l'enceinte de compression. A un temps donné,  $\mu_f$  est considéré comme constant sur toute la périphérie de l'échantillon.

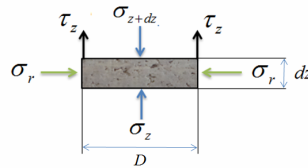


Fig. 2 : Equilibre d'une tranche de béton de chanvre en compression dans la matrice

En appliquant la méthode des tranches à un échantillon cylindrique en équilibre (Fig. 2), dont l'effet de la gravité est considéré négligeable, nous obtenons :

$$\pi \frac{D^2}{4} d\sigma_z = \pi D \tau_z dz \quad (\text{Eq. 3})$$

En développant l'équation (Eq. 3) à partir des équations (Eq. 1) et (Eq. 2) on obtient les relations suivantes pour  $\mu_f$  et  $\alpha$  :

$$\mu_f = \frac{D(\sigma_{z.sup} - \sigma_{z.inf})}{4h\sigma_{rm}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\alpha = \sigma_{rm} \frac{\ln \frac{\sigma_{z.sup}}{\sigma_{z.inf}}}{\sigma_{z.sup} - \sigma_{z.inf}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec :

- $\sigma_{rm}$  : la contrainte radiale moyenne appliquée sur l'échantillon, égale à la contrainte estimée à mi-hauteur.
- $\sigma_{zsup}$  et  $\sigma_{zinf}$  : les contraintes moyennes appliquées respectivement sur le piston supérieur et le inférieur.
- $h$  : la hauteur de l'éprouvette au cours de la compression.

La démarche d'étalonnage de la matrice a consisté à comprimer de l'eau, à différentes hauteurs et à mesurer les déformations observées par les jauges. La nature incompressible de l'eau, ainsi que la nature hermétique de l'enceinte de compression, nous assure une parfaite transmission de la contrainte axiale sur la paroi de la matrice. De plus, nous avons pris soin de lubrifier avant chaque essai la paroi interne de la matrice, afin de limiter le frottement et d'avoir une transmission des efforts la meilleure possible. L'étalonnage des quatre jauges réalisé, nous avons accès aux contraintes radiales situées à hauteur de jauge. Pour obtenir une valeur de contrainte à mi-hauteur, on applique une relation de barycentre entre les deux valeurs des jauges les plus proches.

## 2.2 Essais mécaniques

La caractérisation mécanique des éprouvettes de béton de chanvre, s'est faite après 28 jours de maturation par compression uni-axiale, via la presse Zwick/Roell HB-T 250, dont la capacité maximale est de 32 MPa. L'éprouvette est au préalable surfacée afin de disposer de deux surfaces planes, puis positionnée entre les deux plateaux de la machine d'essai. L'éprouvette de dimension finale  $\varnothing 100 \times 200$  mm est ensuite sollicitée en déplacement.

Pour pouvoir comparer les différentes formulations, le module d'Young et deux valeurs de contrainte à la déformation sont considérées. La première,  $fc_{0,015}$  correspond à une déformation de 1,5%, tandis que la deuxième,  $fc_{0,075}$  correspond à 7,5% de déformation.

Nguyen et al (2010), ont montré que les essais de compression sont assez reproductibles. Les courbes force en fonction du déplacement, voir

Fig. 5, ont effectivement été répétables pour l'ensemble des tests réalisés.

## 2.3 Essais thermiques.

Des mesures de conductivité thermique ont été réalisées selon la technique de la plaque chaude gardée. Cette expérience se réalise en régime permanent et a pour principe d'imposer à un échantillon un flux de chaleur unidirectionnel constant, tout en imposant et en contrôlant la différence de température présente à ses bornes supérieure et inférieure. Le flux de chaleur est mesuré et régulé par le biais d'une résistance chauffante, constituant la plaque chaude. Afin de garantir un bon transfert de sa puissance émise vers l'échantillon, l'élément chauffant est placé au centre d'une garde arrière, maintenue à la température de l'élément chauffant. Enfin, selon les dimensions de l'échantillon, une garde latérale peut être ajoutée pour prévenir des éventuels pertes de chaleur, par rayonnement ou convection et assurer une bonne unidirectionnalité du flux.

Dans le but de minimiser les échanges thermiques avec l'extérieur, les températures choisies pour ces essais thermiques, avoisinent de  $\pm 5^\circ\text{C}$  la température ambiante de  $20^\circ\text{C}$ , c'est à dire  $25^\circ\text{C}$  pour la plaque chaude, et  $15^\circ\text{C}$  pour la plaque froide. La conductivité thermique  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) est alors donnée par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\phi/S}{(T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}})/e} \quad (\text{Eq.6})$$

Avec :  $\phi$ , le flux de chaleur (W),  $e$ , l'épaisseur de l'échantillon (m),  $S$ , la Surface de l'échantillon (m<sup>2</sup>).

Dans le cadre de cette étude deux types de mesures de conductivité thermique sont réalisés. Elles permettent entre autres de montrer l'anisotropie du matériau, et l'effet d'une orientation préférentielle suite au compactage [8]. Ainsi quatre mesures sont réalisées par échantillon, dont deux dans la direction axiale (parallèle à l'axe de compression) situées à la base et en haut de l'échantillon, ainsi que deux mesures radiales situées à mi-hauteur supérieure et inférieure de l'éprouvette. Pour assurer une mesure intrinsèque des propriétés thermiques, les échantillons ont été séchés à 65°C durant 7 jours.

### 3. Résultats et discussion.

#### 3.1 Etude du compactage :

On obtient Fig. 3 (a), pour une même masse volumique moyenne en chènevotte, une force de compression pour le granulat humide inférieure. A contrario (Fig. 3 (b)), le coefficient de frottement est quant à lui supérieur pour la chènevotte humide. L'humidité présente dans la chènevotte, diminue donc la rigidité de la particule de chanvre, et facilite sa déformation. Mais du fait, d'un coefficient de frottement plus important dans le cas humide, l'eau n'agit pas comme un lubrifiant mais semble avoir plutôt l'effet inverse. N.Kaliyan et R.V. Morey [15], ont étudié l'influence de l'eau présente dans la biomasse et montré que l'eau extraite durant la compression comportait plusieurs éléments pouvant jouer le rôle de liant naturel.

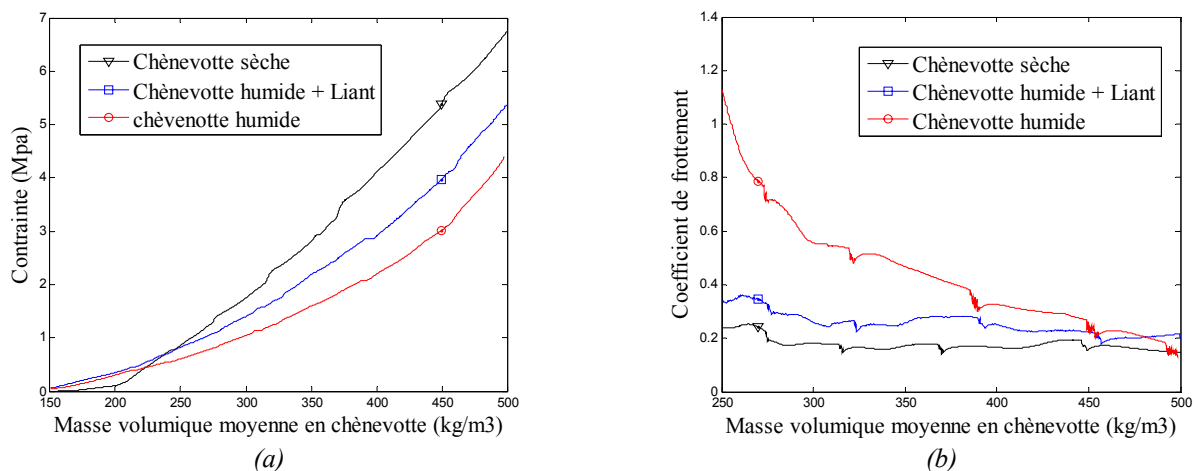


Fig. 3: Evolution de la contrainte moyenne de compactage (a) et du coefficient de frottement à la paroi (b) en fonction de la concentration moyenne en granulat dans la matrice de compactage.

L'apport d'une cohésion intergranulaire, peut entraîner une diminution du coefficient de transmission (voir fig. 4). De par cette cohésion, la force axiale est moins transmise de manière radiale tandis que la plus grande déformabilité des grains humides peut entraîner une plus grande surface de contact avec les parois du cylindre. Cela pourrait expliquer en partie l'augmentation globale du coefficient de frottement qui est observé en début de compression.

L'ajout de liant à la chènevotte humide, permet d'obtenir un comportement intermédiaire à ceux de la chènevotte sèche et humide. Une partie du liant anhydre mobilise en effet une partie de l'eau disponible dès les premières étapes du compactage, sans pour autant apporter de cohésion particulière du mélange à ce stade du procédé.

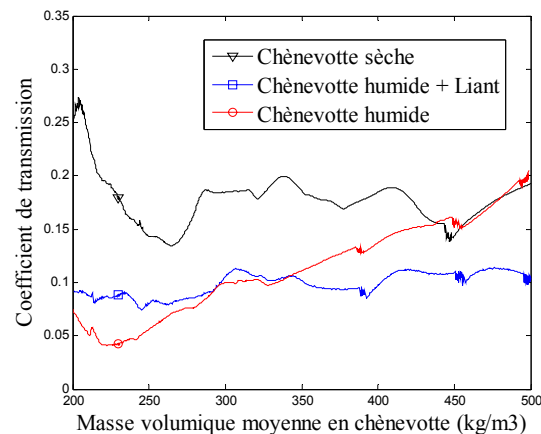


Fig. 4 : Evolution du coefficient de transmission en fonction de la concentration moyenne en granulat dans la matrice de compactage.

On observe Fig. 4, que pour de faibles densités, le coefficient de transmission de la chènevotte humide est faible comparé aux deux autres. Cela montre que sous l'effet de l'eau extraite de la chènevotte, il y a cohésion du matériau.

Les coefficients de transmission (voir Fig. 4) ne semblent pas varier significativement avec la densité du matériau compacté, excepté dans le cas de la chènevotte humide. Cela peut être dû à une transmission de l'effort radial, qui initialement assuré par la chènevotte, est au cours de la compression transmise par l'eau, dont la teneur volumique approche l'état de saturation. La perméabilité du milieu poreux est alors fortement diminuée rendant l'évacuation de l'air occlus difficile. Le matériau devient alors incompressible à notre échelle d'observation. Ce phénomène de transmission des efforts, agit à de plus fortes densités lors de formulation avec du liant, et génère une limite physique à la compression du matériau à l'état frais par ce procédé.

Gustafson et Kjelgaard [16] ont étudié la compaction de la biomasse à différent taux d'humidité (28-44% en masse) et montré que la densité du produit diminue lorsque le taux d'humidité augmente. Mani et al [11], ont observé le même phénomène, et obtenue la meilleure densité pour une humidité comprise entre 5 et 10% de la canne de maïs.

### 3.2 Caractéristiques mécaniques :

Sur les trois premières formulations, nous substituons du liant (chaux + eau) par de la chènevotte, en masse équivalente. Le poids volumique initial de la chènevotte étant plus faible que celui de la pâte de liant, cela implique une contrainte de compactage qui augmente lorsque le dosage en granulat ( $\text{kg/m}^3$ ) augmente. La contrainte de compactage est néanmoins inférieure à 2,2 MPa dans ces trois cas.

Cette première série de trois courbes montre que, pour des bétons de chanvre de même masse volumique globale ( $816 \text{ kg/m}^3$ ), le liant (chaux + eau) peut être remplacé efficacement par des granulats de chanvre, puisque la résistance mécanique en compression augmente lorsque le dosage en granulat augmente. Par ailleurs ce dernier présente l'avantage d'avoir un impact environnemental nettement plus faible que celui de la chaux pour coût comparable.

La quatrième formulation a été réalisée dans la matrice présentée fig. 1, permettant d'appliquer une contrainte de compactage supérieure pour atteindre le dosage visé de  $500 \text{ kg/m}^3$  de granulat. Dans ce cas, l'ajout de granulat ne substitue en masse qu'une partie du liant des formulations de la première série puisque la masse volumique globale est dans ce cas

de ( $920 \text{ kg/m}^3$ ). En effet, pour une telle densité de granulat, il est nécessaire d'avoir une quantité minimale de liant pour assurer la cohésion et la stabilisation du matériau. Pour des dosages inférieurs ( $855 \text{ kg/m}^3$ ) un retour élastique du matériau déconfiné après 48h a d'ailleurs été observé.

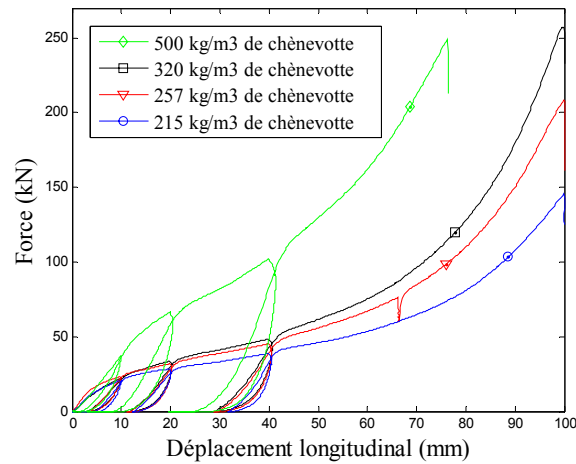


Fig. 5 : Comportement en compression à 28 jours des quatre bétons de chanvre formulés.

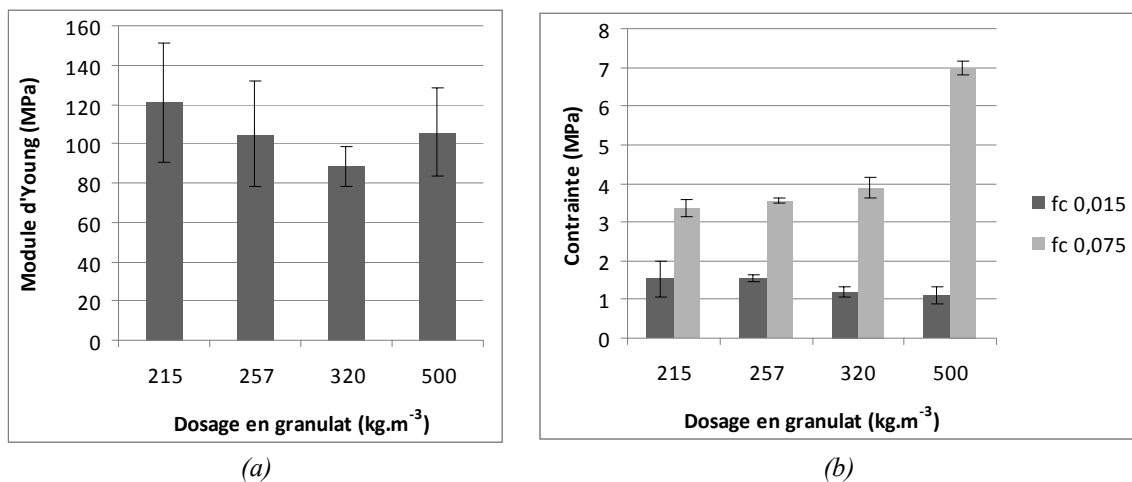


Fig. 6 : Caractéristiques mécaniques des différentes compositions de bétons de chanvre élaborées.

Cette dernière formulation confirme néanmoins que le dosage en granulat continue à contribuer significativement à la résistance mécanique du matériau tout en conservant un comportement similaire, i.e. pas de rupture fragile et une grande capacité de déformation.

La contrainte exercée pour 7,5 % de déformation relative est ainsi multipliée par 2 (voir Fig. 76) par contre, comme observé dans des études précédentes (Nguyen & al) [6] pour des dosages en granulat plus faible, le module d'Young n'augmente pas significativement et demeure relativement modeste pour une utilisation dans le cadre de la construction de bâtiment.

### 3.3 Caractéristiques thermiques :

D'un point vu thermique, l'action du compactage engendre une diminution de la porosité au sein de la chanvre et augmente ainsi la conductivité thermique du composant le moins conducteur du matériau. Cependant, le compactage permet aussi de diminuer la quantité de

liant, le composant le plus conducteur thermiquement. D'un point de vu global ou macroscopique, ces deux points se contre balencent, et aucune augmentation significative de la conductivité thermique n'est observée dans le cadre de la présente étude.

Par ailleurs, il a été observé que sous l'effet du compactage les particules de chènevotte vont présenter une orientation préférentielle dans le plan horizontal, perpendiculaire au sens du compactage [8]. Cela engendre des propriétés anisotropes au sein du matériau. Deux conductivités thermiques distinctes horizontale et verticale ont été mesurées (fig. 7). Le rapport entre celles-ci,  $\lambda_{\text{horizontale}}/\lambda_{\text{verticale}}$ , est de l'ordre de 2, proche de celui observé dans d'études précédentes [8] sans évolution significative avec le dosage en granulat. En effet, un compactage plus important induit une orientation préférentielle plus marquée des particules de chènevotte. Mais dans ce cas, leur plus grande conductivité thermique, liée à leur plus faible porosité, engendre un plus faible contraste entre les phases (chènevottes et liant) qui tend à réduire le caractère anisotrope du matériau.

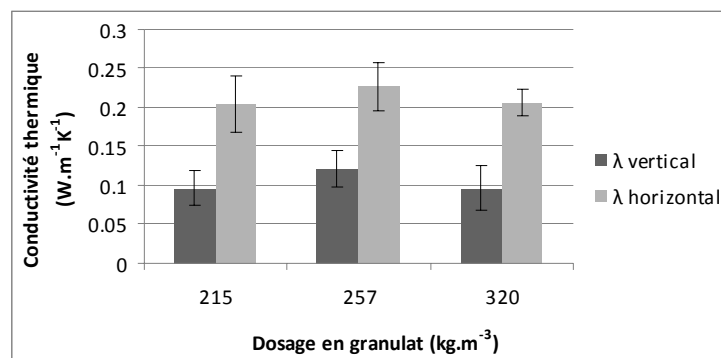


Fig. 7 : Effet du dosage en granulat sur la conductivité thermique des bétons de chanvre

#### 4. Conclusion

Cette étude sur la préfabrication d'éléments de construction en béton de chanvre par compactage à l'état frais a permis de mettre en évidence les points suivants :

- Le granulat végétal est fortement compressible. Le compactage à l'état frais, via un dispositif adapté, permet de maîtriser la densité de granulat au sein du matériau jusqu'à 500 kg/m<sup>3</sup>.
- La diminution du dosage en eau et/ou la présence de chaux favorisent la compaction du matériau à l'état frais tout en réduisant significativement le frottement à la paroi du moule, source potentielle d'hétérogénéité au sein des éléments préfabriqués.
- L'augmentation du dosage en granulat par compression contribue à diminuer le volume des pores, et par conséquent à augmenter la résistance mécanique de matériau. Cependant, il ne permet pas d'augmenter le module d'élasticité qui demeure encore modeste au regard des matériaux de construction usuels.
- Le dosage en liant (chaux et eau) peut être diminué, voir substitué efficacement par des granulats végétaux dans le cadre de ce procédé de fabrication.
- La conductivité thermique du matériau et son anisotropie n'est pas significativement affectée lorsque le liant est substitué par des granulats compactés en dosage équivalent.
- Le procédé de compactage à l'état frais étudié permet de diminuer l'impact environnemental du matériau dans son ensemble, par la diminution du dosage en liant à la fabrication, et en augmentant la résistance mécanique des bétons de chanvre en service sans affecter de façon notable leur conductivité thermique.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Fondation de France pour son soutien financier, sans lequel les travaux présentés n'auraient pas pu être menés.

## Références

- [1] (ADEME), Agence de L'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 2009.
- [2] E. Henry, Lanier, O.Beherec, B.Boyeux. *Impacts environnementaux et sanitaires des matériaux Chanvre*. 2008 : Séminaire Scientifique 29 et 30 septembre.
- [3] Grennelle de l'environnement. 2007.
- [4] C.Baley. *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. s.l. : Techniques de l'ingénieur. Ref. AM. 5 130.
- [5] S. Elfordy, F. Lucas, F.Tancret, Y.Scudeller, L.Goudet. *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hemprete") manufactured by a projection process*. s.l. : Construction and Building Materials, 2007.
- [6] T.-T. Nguyen, V. Picandet, S. Amziane, C. Baley. *Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete*. s.l. : European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol n°13, n°9, pp. 1039-1050, 2009.
- [7] M.Boutin, C.Flamin, S.Quinton. *Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*. s.l. : Ministère de l'agriculture et de la pêche., 2006.
- [8] T and -T. Nguyen, V. Picandet, P. Carré, T.Lecompte, S.Amziane, C.Baley. *Effect of compactness on mechanical and thermal properties of hemp concrete*. s.l. : European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 14,n° 5, pp.545-560, 2010.
- [9] Nalladurai Kaliyan, R. Vance Morey. *Constitute model for densification of corn stover and switchgrass*. s.l. : Biosystems Engineering Vol n°104. pp.47-63, 2009.
- [10] N.Chevanan, A.R.Womac, Venkata S.P. Bitra. *Bulk density and compactation behavior of knife mill chopped switchgrass, Wheat straw, and corn stover*. s.l. : Bioresource Technologie, Vol n°101.pp.207-214., 2010. Vols. Vol n°101.pp.207-214.
- [11] S.Mani, Lope.G. Tabil, S.Sokhansanj. *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*. s.l. : Biomass and Bioenergy,Vol n°30.pp.648-654., 2006.
- [12] N.Kaliyan, R.Vance.Morey. *Densification characteristics of corn cobs*. s.l. : Fuel Processing Technology, Vol n° 91.pp.559-565., 2010.
- [13] T.Lecompte. *Etude expérimentale et numérique de la compression de poudre organique en presse à rouleaux, alimentée par une vis sans fin*. s.l. : Thèse de doctorat, 2005.
- [14] F.Toussaint. *Etude expérimentale et simulation numérique de la mise en forme par compression et frittage de poudre*. s.l. : Thèse de doctorat, 2001.
- [15] N.Kaliyan, R.V.Morey Densification characteristics of corn stover and switchgrass. ASABE Anual International Meeting, American Society of Agriculture,2006b
- [16] A.S.Gustafson, W.L. Kjelgaard Hay pellet geometry and stability. Agriculture Engineering, Vol 44, pp. 442-445,1963