



Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement

Alice Youssef, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, Noël Challamel

► **To cite this version:**

Alice Youssef, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, Noël Challamel. Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.

HAL Id: hal-01167596

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167596>

Submitted on 24 Jun 2015

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.

Comportement du béton de chanvre en compression simple et cisaillement

Alice YOUSSEF, Vincent PICANDET, Thibaut LECOMPTE, Noël CHALLAMEL

Université de Bretagne Sud, EA 4250, LIMATB, F-56100 Lorient, France

{alice.youssef; vincent.picandet; thibaut.lecomppte; noel.challamel}@univ-ubs.fr

RÉSUMÉ. Dans la littérature, la plupart des mélanges chaux/chanvre étudiés montrent un comportement fragile et une très faible résistance mécanique. Les formulations sont généralement riches en liant et légèrement compactées. Jusqu'à présent, ce matériau n'est pas considéré comme un matériau porteur et est principalement utilisé comme isolant de remplissage, combiné avec des composants de structure en bois, en béton ou en maçonnerie. Le présent travail est une étude expérimentale du comportement du béton de chanvre à la compression et au cisaillement, afin d'évaluer la capacité porteuse et au contreventement de ce matériau bio-sourcé, tout en assurant de bonnes qualités d'isolation thermique. Deux séries de tests sont effectuées. Le premier est un test de compression uniaxiale dans chaque direction pour caractériser l'anisotropie mécanique du matériau. Le second permet de caractériser le comportement au cisaillement de différentes configurations de la composition. Les expériences réalisées montrent une ductilité élevée de ce matériau en cisaillement, ce qui confirme les résultats de la littérature sur les structures de paroi. Ces résultats sont très prometteurs, notamment pour des applications parasismiques.

ABSTRACT. In the literature, most studied lime and hemp composites show a brittle behavior and a very low mechanical strength. The formulations are generally rich in binder and slightly compacted.

Up to now, this material is not considered as a load bearing material and is mainly used as filler insulation, combined with structure components made of wood, concrete or masonry. The present work is an experimental study of the compressive and shearing behavior of hemp concrete, in order to study the load-bearing capacity and bracing of this bio based material, while keeping good qualities of thermal insulation. Two series of tests are performed. The first one is a uniaxial compression test in each direction for characterizing the mechanical anisotropy of the material. The second one permits to characterize the shearing behavior of the different mix-designs. Experiments show a high ductility of this material in shearing, which confirms the results of the literature on wall structures. These results are very promising, especially for seismic applications.

MOTS-CLÉS : Composite chaux/chanvre, formulation, moulage par compression, matrice rigide, résistance à la compression, résistance au cisaillement.

KEYWORDS: Lime and Hemp composite, mix design, compression moulding, rigid die, compressive strength, shear strength.

1. Introduction

Les mélanges chaux/chanvre sont très largement utilisés comme matériaux de construction à base de bio-granulats en Europe. Ce matériau associe un liant minéral, habituellement une combinaison de chaux hydraulique et non-hydraulique, avec un granulats principalement constitué de chènevotte, sans ou avec peu de fibres résiduelles. La chènevotte provient du cœur boisé de la tige de chanvre déchiquetée lors du processus de défibrage de la paille de chanvre. Elle est ensuite tamisée en particules de 5 à 40 mm de longueur [PIC 13]. En raison des avantages environnementaux de la chaux aérienne composant une partie du liant et de la culture du chanvre, le béton de chanvre présente, au cours de son cycle de vie, un impact écologique plus faible que les matériaux de construction conventionnels [ARN 00, BOU 06]. Cependant, le béton de chanvre a actuellement une très faible résistance à la compression, inférieure à 2 MPa [CER 05, BUT 04, EIR 06, ELF 08, BRU 09, ARN 11, KIO 05]. Ces faibles caractéristiques à la compression rendent ce matériau inapte à la reprise des charges d'un bâtiment. Le renforcement de ce matériau (en rigidité et en résistance) à la compression lui permettrait de jouer pourtant un rôle mécanique contribuant à l'allègement des ossatures tout en assurant son rôle thermique et hydrique dans l'enveloppe du bâtiment.

Les murs en béton de chanvre peuvent être réalisés en place, par banchage ou projetés. Ces procédés ne permettent pas d'atteindre une compacité élevée ni un contrôle précis des conditions de maturation, entraînant

des résistances mécaniques très faibles. Par exemple, les règles professionnelles françaises émises par l'association « construire en chanvre » [CEN 12] donnent une résistance à la compression de 0,3 MPa pour les murs et les planchers tassés en béton de chanvre. Le béton de chanvre peut également être utilisé pour fabriquer des briques ou blocs creux. Le principal atout de cette méthode est de permettre un meilleur contrôle des conditions de fabrication et de la formulation du matériau. C'est ce procédé qui a été mis en œuvre dans le présent travail. En outre, un compactage contrôlé du mélange à l'état frais permet d'améliorer à terme les propriétés mécaniques du matériau, comme dans [NGU 09a, NGU 09b, TRO 14]. La réduction du volume des vides au sein du matériau entraîne globalement une augmentation de la résistance à la compression du béton de chanvre. Ce processus de préfabrication améliore donc la résistance mécanique tout en limitant la fraction de liant dans le mélange.

Dans le présent travail, deux mélanges inspirés du travail de Tronet et al. [TRO 14a, TRO 14b] sont étudiés et comparés au comportement d'un bloc de chanvre commercial (Chanvribloc®). Nozahic et al. [NOZ 12] montrent que les blocs compactés de bétons à base de bio-granulats ont un comportement mécanique anisotrope. Le compactage induit une orientation des particules de chènevotte en couches, orthogonalement à la direction de compactage. Dans les autres directions, le chènevotte est orientée de manière aléatoire. Ceci induit un comportement isotrope transverse. Un des objectifs de la présente étude est de mesurer ce degré d'anisotropie en compression, et d'évaluer les différences induites par le compactage.

Une limitation dans le développement du béton de chanvre est son coût, dû notamment à son association encore indispensable avec des composants structuraux en bois. Les sections de bois sont généralement conçues en considérant les blocs chaux/chanvre comme non porteurs, et jouant principalement le rôle de remplissage isolant. En réalité, les murs de béton de chanvre devraient être en mesure de supporter une partie de la charge, et participer au contreventement. Cela permettrait de réduire les sections de bois, et potentiellement d'économiser de la matière structurelle. Des essais de contreventement ont déjà été menés sur des parois de structure bois et chaux/chanvre projeté [MUN 13]. Ils montrent que le remplissage chaux/chanvre n'est pas seulement en mesure de remplacer les poutrelles de contreventement, mais il permet aussi d'améliorer la rigidité et la résistance globale de la structure au cisaillement. L'un des objectifs de ce travail est donc de mesurer le comportement intrinsèque des mélanges chaux-chaux au cisaillement. Une cellule de cisaillement a été développée pour solliciter des cubes de béton de chanvre. Cette géométrie cubique permet également de caractériser le degré d'anisotropie de ce matériau au cisaillement.

Les principaux objectifs de ce travail sont les suivants: 1 – quantifier et observer l'anisotropie de trois formulations différentes de béton de chanvre: un bloc du commerce (mis en forme vibration), un bloc moyennement compacté (masse volumique de 670 kg/m³ à l'état frais), et un bloc fortement compacté (masse volumique de 860 kg/m³ avec une teneur élevée en chènevotte); 2 – mesurer le comportement au cisaillement de blocs de béton de chanvre.

2. Matériaux et protocoles

2.1. Matériaux

Blocs de brique de chanvre du commerce : Un des matériaux testés provient de blocs commerciaux fournis par Chanvribloc®. Sa véritable composition n'a pas été donnée par le fournisseur, mais il est essentiellement constitué du chènevotte et liant hydraulique. Sa masse volumique à l'état sec est de 340 kg/m³. Les blocs sont mis en forme par vibration. Une faible anisotropie est donc aussi susceptible d'apparaître sur ce type de matériau.

Granulats : Dans cette étude, la chènevotte a été totalement séparée des fibres en utilisant un procédé de broyage mécanique. Cet agrégat d'origine biologique est caractérisé par une très faible masse volumique apparente (environ 110 kg/m³) en raison de sa structure très poreuse. La taille des capillaires est comprise entre 10 et 50 µm à l'intérieur des particules de chènevotte non compactées. En conséquence, ces granulats présentent une grande capacité d'absorption d'eau, jusqu'à 270% de leur masse sèche au bout de quelques minutes [NGU 09a; CHA 11]. La masse volumique des particules de chènevotte est de 280 kg/m³, mesurée par Pham [PHA 14]

Liant : Un liant à base de chaux appelé Tradical ® PF 70 (groupe Lhoist) a été utilisé. Il se compose de 75% de chaux aérienne Ca(OH)₂, 15% de chaux hydraulique et 10% de pouzzolane. Sa masse volumique de paroi cellulaire, donnée par le fournisseur, est de 2450 kg/m³.

2.2. Formulations et procédé de compression à l'état frais

Deux mélanges de béton de chanvre ont été conçus sur la base des travaux de Pierre Tronet [TRO 14a, TRO 14b]. La capillarité et le caractère déformable de la chènevotte rendent le mélange plus difficile que pour un béton ou un mortier traditionnel. La phase de mélange consiste en deux étapes: 1 – mélange de chènevotte sèche (après 72 heures en étuve ventilée) et d'eau pendant 5 minutes à 140 tours par minute dans un mélangeur planétaire Hobart; 2 – ajout de la chaux et mélange pendant 5 minutes à 140 tours par minute. Au cours de la première étape, l'eau de gâchage est totalement absorbée par les particules de chènevotte et le liant reste à l'état pulvérulent. Cela signifie que la deuxième étape est assimilable à un mélange de particules sèches. L'eau est libérée par les granulats végétaux et sera restituée durant le processus de compactage afin de permettre une hydratation homogène de la chaux. La quantité d'eau doit être calculée en fonction de la teneur en liant, l'eau essorée des granulats devient disponible pour l'hydratation de la chaux. Les formulations des bétons de chanvre étudiés sont présentées en Tableau 1.

	M1	M4
Chènevotte (C) [kg/m ³]	215	500
Liant (L) [kg/m ³]	387	270
Eau (E) [kg/m ³]	213	148
Rapport E/L lors du malaxage	0,55	0,55
L/C	1,8	0,54
Masse volumique à l'état frais [kg/m ³]	816	920
Compacité à vert	0,52	0,6
Compacité finale	0,37	0,55

Tableau 1. Formulations étudiées.

E/L est le rapport massique eau sur le liant, égal à 0,55 pour chaque mélange. Le dispositif de compression est décrit plus précisément dans [TRO 14].

La valeur cible pour la hauteur finale est de 200 mm pour chaque échantillon cylindrique. Chaque test est commandé en déplacement 1 mm/s. À la fin de l'étape de compression, l'échantillon atteint une compacité donnée, appelée «compacité à vert» dans le Tableau 1. La compacité est effectivement le paramètre le plus important pour caractériser l'état de compactage, en raison de la différence de la masse volumique entre l'eau, la chènevotte et la chaux. Dans cette étude, les masses volumiques des constituants sont 1465 kg/m³ pour les parois cellulaires constituant la phase solide de la chènevotte, et 2450 kg/m³ pour le liant. A la fin du processus de compression, chaque échantillon est maintenu à hauteur constante de 200 mm, pendant 72 heures afin d'assurer une hydratation minimum de la chaux, afin d'éviter l'arrachement de l'échantillon lors de son extraction de la matrice de compression et de limiter les effets liés au retour élastique lors du déconfinement. Les blocs de béton de chanvre sont ensuite placés dans une chambre contrôlée en température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $70 \pm 5\%$ HR) jusqu'à leur caractérisation mécanique. Les cylindres de la formulation M4 doivent également être maintenus lors de la maturation pour éviter un retour viscoélastique. Au cours de la maturation des échantillons, de l'eau liquide est consommée par l'hydratation de la chaux mais une grande quantité s'évapore. C'est pourquoi la compacité apparente finale des échantillons, i.e. la somme des volumes des constituants divisé par le volume total occupé par le matériau, est plus faible que la compacité à vert (juste après le compactage à l'état frais), comme reporté dans le Tableau 1.

2.3. Usinage des échantillons cubiques

Deux échantillons cubiques de 7cm de coté (Figure 1) sont usinés à partir de chacun des cylindres de béton de chanvre à l'état durci. Un cube dans la partie supérieure (H) et l'autre dans la partie inférieure (B), comme indiqué en Figure 1a. Une scie à ruban est utilisée pour assurer une bonne planéité et le parallélisme des faces du cube. Deux types de sollicitation (cisaillement et compression uniaxiale) et plusieurs directions de sollicitation (parallèle ou orthogonale à la direction de compactage lors de la fabrication) sont appliquées pour chacune des formulations (M1, M4 ou Chanvribloc®).

2.3. Caractérisation du comportement à la compression

Le comportement à la compression est mesuré en compression simple, sous une presse de 500 kN équipée d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement. Les compressions sont pilotées en déplacement avec une vitesse de 1 mm/s pour assurer des conditions quasi-statiques. Quatre capteurs LVDT sont également positionnés

pour mesurer la déformation transversale lors de la compression (Figure 2). Dans le présent travail, les compressions sont monotones.

Des compressions complémentaires ont été réalisées sur des cubes de 7 cm, 10 cm et 15 cm de côté, extraits de briques Chanvribloc®. Ces tests sont effectués pour évaluer de possibles effets d'échelle.

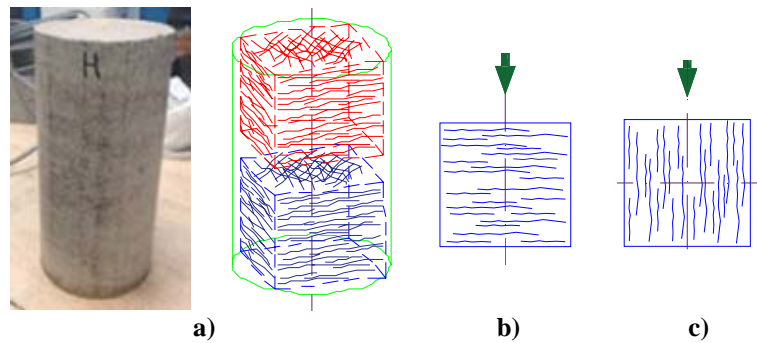


Figure 1. (a) échantillon cubique dans le cylindre compacté L20cm x Φ 10cm, montrant l'orientation de la chènevotte; (b) compression simple orthogonale avec le processus de compactage; (c) compression simple parallèle avec le processus de compactage.

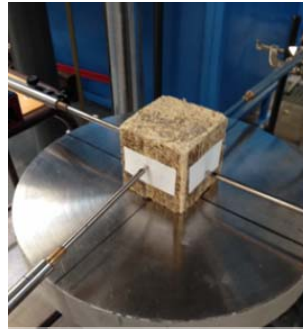


Figure 2. Échantillon cubique avant l'essai de compression simple.

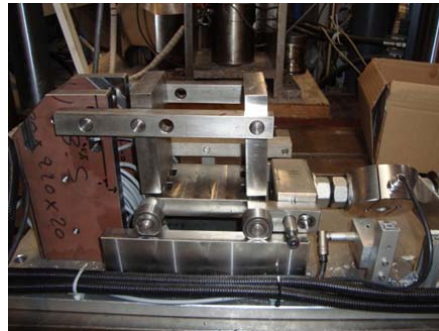


Figure 3. Boîte de cisaillement.

2.4. Caractérisation du comportement au cisaillement

Un dispositif de cisaillement dédié a été développé pour ce travail. Il est présenté en Figure 3. Il est constitué d'une boîte de cisaillement dont le volume intérieur en position initiale correspond à l'échantillon étudié (cubes de 7 cm ou 10 cm). La boîte de cisaillement peut présenter plusieurs avantages : les directions principales tournent pendant le test, comme elles le font dans un mur lors de sollicitations de contreventement. L'utilisation d'échantillons relativement petits devrait permettre à chaque type de mur (mince ou épais, compacté, banché ou projeté ...) d'être testé. Un principal inconvénient théorique de cette boîte de cisaillement est que les contraintes principales ne peuvent pas être obtenues directement à partir des données. Ceci rend compliqué la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans une configuration de sollicitation triaxiale ou de cisaillement direct. L'autre principal inconvénient est que la contrainte et la déformation ne sont pas uniformes au sein de l'échantillon. En particulier, la partie de l'échantillon dans les angles aigus du parallélogramme formé lors de

l'essai tend à être plus densifiée que le reste de l'échantillon. Un autre problème pratique est que les forces appliquées à la boîte de cisaillement ne sont pas alignées, de sorte qu'elles forment un couple qui tend à incliner la boîte et à faire basculer l'échantillon au cours des tests. Une charge verticale a été appliquée à l'échantillon, en plaçant le dispositif sous une presse de 250 kN. Le déplacement horizontal de la plaque inférieure de la boîte est quant à lui réalisé par un vérin électrique à vis. La partie supérieure de la boîte est fixée horizontalement (Figure 3), mais est libre de se déplacer verticalement.

La charge de cisaillement, la charge verticale et les déplacements verticaux et horizontaux sont mesurés par les capteurs. La déformation de cisaillement peut être calculée comme le rapport entre le déplacement horizontal de la plaque inférieure et la hauteur de l'échantillon. La déformation de cisaillement maximale possible avec cet appareil est d'environ 0,5. Cette boîte est destinée à simuler la déformation au sein d'une structure poteau – poutre sans contreventement, avec une faible vitesse de cisaillement ($0,015 \text{ s}^{-1}$).

3. Résultats

3.1. Comportement à la compression

La Figure 4 montre des courbes typiques lorsque la compression est appliquée perpendiculairement à la direction de compactage lors de la fabrication de M1 et M4, et des vibrations dans le cas de Chanvribloc®. Chaque mélange a un comportement fragile. Au cours des expériences, les échantillons M1 et M4 rompent en "accordéon". Cette observation nous conduit à supposer que les couches de chènevette, qui sont parallèles au sens de contrainte principale, s'effondrent par flambement. Sur ces courbes, la résistance en compression est assez facile à caractériser: elle correspond au pic de la courbe contrainte-déformation. La résistance à la compression moyenne, calculée à partir des résultats du programme expérimental complet, est donnée dans le Tableau 3. La Figure 5 donne la courbe typique lorsque la compression simple est faite dans la même direction que celle de fabrication. Dans ce cas, les couches de chènevette sont perpendiculaires à la direction principale de chargement, et le comportement est très ductile, avec une partie quasi-élastique et une partie d'écroutissage plastique. Il est difficile d'extraire une résistance à la compression directement à partir de ces courbes. Tronet et al. [TRO 14b, LEC 15] suggèrent un paramètre de contrainte objectif qui permet de comparer les courbes et de caractériser la résistance de chaque échantillon. Ce paramètre est la limite d'élasticité σ_y , calculé comme expliqué sur la Figure 6. Avec cette méthode, les différentes contraintes moyennes σ_y , obtenues sont données dans le Tableau 3. L'âge des éprouvettes testées varie de 128 à 253 jours, et chaque essai est répété trois fois pour vérifier sa reproductibilité.

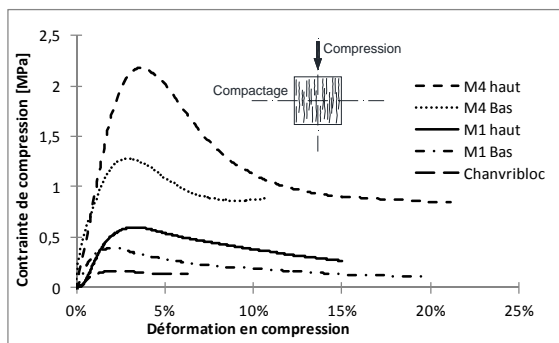


Figure 4. Comportement à la compression, perpendiculairement au processus de fabrication (CO)-courbes typiques pour M1, M4 et Chanvribloc®

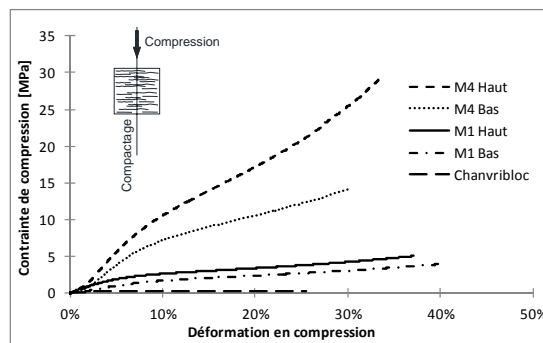


Figure 5. Comportement à la compression, parallèlement au processus de fabrication (CP) - courbes typiques pour M1, M4 et Chanvribloc®.

Tout d'abord, il faut noter que la dispersion est très élevée dans le cas de compressions orthogonales à la direction de fabrication (CO). Les résultats doivent être corrélés aux valeurs par défaut et au comportement en traction entre les couches de chènevette. Néanmoins, la tendance d'une corrélation entre la résistance à la compression et l'état de compactage est observée. Cela signifie que pour une plus grande proportion de chènevette (M4), le comportement de compression transversale présente une meilleure résistance, même s'il y a moins de liant. Cette résistance à la compression plus élevée est probablement due à la limitation de la porosité et à un comportement plus rigide lorsque la compacité diminue (Tableau 2).

La limite d'élasticité en compression parallèle (CP) est toujours supérieure à la résistance à la compression dans le sens orthogonal (CO). En comparant cette contrainte avec les résultats de Tronet et al. [TRO 14b, LEC 15], on constate que la résistance d'un cylindre est proche de la résistance de son maillon le plus faible, associé

avec le cube extrait de la partie basse de chaque cylindre. Il confirme que le frottement au long de la cellule de compactage induit une hétérogénéité significative du comportement mécanique dans un même bloc cylindrique. Ce processus de compactage doit être techniquement amélioré afin de minimiser ce problème et d'assurer une meilleure homogénéité des éléments préfabriqués. Le comportement très instable et variable des échantillons dans la direction transversale, ajouté à une faible résistance à la compression, les rendent inaptes à une mise en œuvre dans le sens transversal comme matériau porteur, ou même dans un mur auto porté.

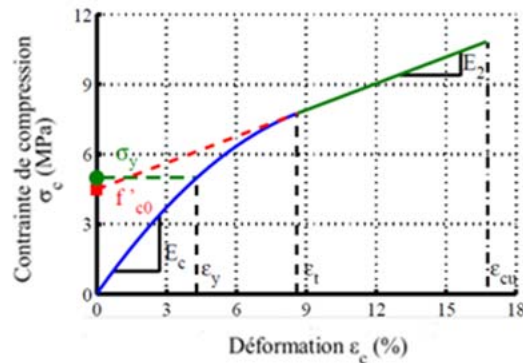


Figure 6. Détermination de σ_y , lorsque la compression simple est appliquée dans le sens du compactage réalisé lors de la fabrication (CP).

Les tests complémentaires effectués sur des cubes de Chanvribloc® de tailles différentes (cubes de 7 cm, 10 cm et 15 cm) ont montré qu'il n'y a pas d'effet de taille dans cette gamme de longueur sur la contrainte moyenne mesurée. En revanche, dans le sens transversal, la dispersion des résultats est d'autant plus élevée que l'échantillon est petit. Ceci est probablement lié au rapport entre la taille de l'échantillon (entre 7 et 15 cm) et la taille des hétérogénéités : les particules de chènevotte pouvant mesurer jusqu'à 3cm de longueur. Leur taille varie donc du cinquième à la moitié de la taille des éprouvettes. Néanmoins, la taille des échantillons a un effet négligeable comparé à son élancement : la comparaison du travail expérimental de Pierre Tronet [TRO 14b] avec la présente étude montre que les valeurs de la limite d'élasticité obtenues sur des cubes (rapport d'élancement de 1) et sur des cylindres (rapport d'élancement égal à 2) sont similaires, mais que l'écroutissage plastique de la matière est considérablement amplifié avec les cubes.

		Resistance à la compression σ_c	Limite élastique σ_y	Limite élastique σ_y obtenue sur éprouvette cylindrique [Tronet14b]
		[MPa] (CO)	[MPa] (CP)	[MPa] (CP)
M1	Haut	0,72±0,36	1,90±0,30	1,40
	Bas	0,31±0,16	1,18±0,14	
M4	Haut	1,62±0,51	6,87±0,58	4,70
	Bas	1,30±0,07	4,30±0,85	
Chanvribloc®		0,13±0,06	0,27±0,12	-

Tableau 2. Comportement à la compression des différents mélanges de configuration en (CP) et (CO).

3.2. Comportement en cisaillement

Les figures 7 à 9 montrent les premiers résultats obtenus avec la boîte de cisaillement. On peut observer qu'aucune rupture brutale ne se produit au cours de ces expériences. Pour les mélanges M1 et Chanvribloc, un changement dans la pente semble apparaître lorsque la déformation atteint 2%. Il pourrait correspondre à une transition entre une phase élastique et une phase plastique de cisaillement, comme déjà observé dans le cas de la compression uniaxiale.

L'absence de phase fragile dans la réponse de cisaillement, pour chaque matériau testé, permet d'envisager certaines applications structurales: cela peut permettre de dissiper une grande quantité d'énergie par déformation, en cas de tremblement de terre par exemple. Contrairement à certains matériaux classiques de construction, les blocs de béton de chanvre, même pour les matériaux légèrement compactés, peuvent jouer un rôle important dans une construction parasismique. Comme observé sur la Figure 9, la résistance au cisaillement

est en corrélation avec la charge de confinement (charge verticale appliquée par la presse). Ce résultat est bien connu de la mécanique des sols, où l'on peut déterminer un paramètre de cohésion en traçant les limites d'écoulement dans un diagramme de Mohr (Contrainte de cisaillement/ Contrainte normale). Dans le cas présent, l'absence de pic dans la réponse au cisaillement n'a pas permis de déterminer un critère explicite de résistance. Néanmoins, on peut supposer que le cisaillement s'effectue par glissement et frottement des couches de chènevotte. Pour aller plus loin dans ce travail, des expériences complémentaires pourraient être réalisées: la mesure du champ de déformation avec une caméra et un logiciel de traitement d'images devrait donner davantage d'indications sur le comportement de cisaillement et la localisation des déformations dans l'échantillon.

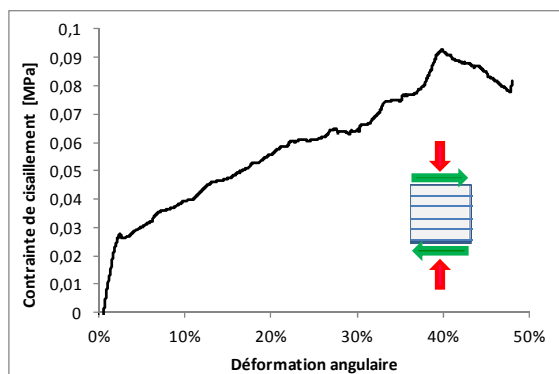


Figure 7. Cisaillement orthogonal à la direction de fabrication – Chanvribloc® avec une charge verticale de 0,2 MPa.

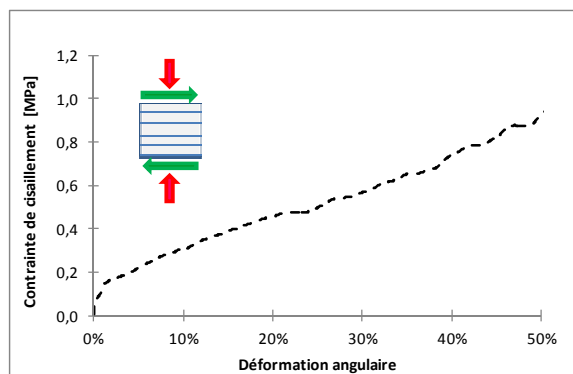


Figure 8. Cisaillement orthogonal à la direction de fabrication-M1Bas avec une charge verticale de 1 MPa

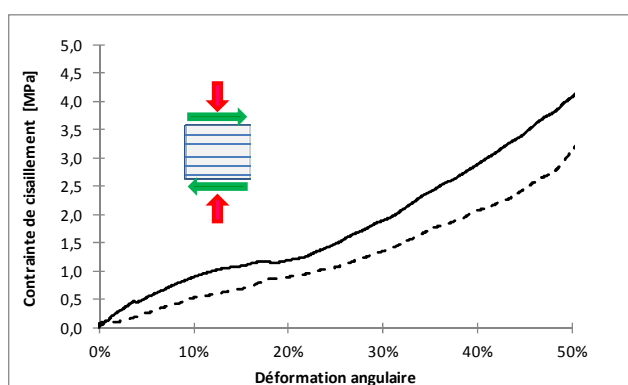


Figure 9. Cisaillement appliqué orthogonalement à la direction de fabrication - M4 Haut avec une charge verticale de 1 MPa (ligne pointillée) et 2 MPa (trait plein).

4. Conclusion

Des échantillons cubiques de bétons de chanvre ont été testés à la fois en compression et en cisaillement. Dans ce but, une cellule de cisaillement originale a été développée. Les mesures de compression ont montré que ce matériau est anisotrope, même quand il est moulé industriellement par vibrations. Le comportement transversal est fragile, avec un comportement très variable et instable. Ces résultats concordent avec ceux de Nozahic et al. [NOZ 12] qui montrent, un comportement ductile dans la direction de compactage, et un comportement fragile et plus rigide perpendiculairement à la direction de compactage avec des matériaux d'origine bio-sourcés et un liant chaux-pierre ponce. Dans la zone quasi-élastique, le comportement de cubes (rapport d'élanement de 1) est similaire à ceux de cylindres de rapport d'élanement égal à 2. Dans la phase d'écrouissage plastique, la diminution du rapport d'aspect conduit à l'augmentation de la rigidité.

En ce qui concerne la configuration de la boîte de cisaillement, des expériences exploratoires ont été effectuées. Elles montrent que la rigidité en cisaillement est corrélée à la contrainte normale, comme observé classiquement en mécanique des sols, et que le comportement en cisaillement de blocs de béton de chanvre est très ductile. Ces résultats expérimentaux confirment les résultats déjà obtenus dans une précédente étude expérimentale à l'échelle de parois préfabriquées [MUN 13]. Ce comportement est intéressant pour le contreventement de murs remplis de béton de chanvre et son étude mérite d'être encore approfondie.

5. Bibliographie

- [ARN 00] Arnaud L, Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches, Bioresources Hemp 2000.
- [ARN 11] Arnaud L, Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concrete, *Construction and building materials*;28:50-56, 2011.
- [BOU 06] Boutin MP, Flamin C, Quinton S, Gosse G. Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie. Ministère de l'agriculture et de la pêche, France, 2006.
- [BRU 09] Bruijn PB, Jeppsson KH, Sandin K, Nilsson C. Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres; 103: 474-479, *Biosystems Eng* 2009.
- [BUT 04] Bütschi PY. Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction. PhD Thesis, Moncton University, Moncton, Canada, 2004.
- [CEN 12] Construire en chanvre, règles professionnelles d'exécution de construction, ISBN : 978-2-35917-046- 7, SEBTP 2012.
- [CER 05] Cérézo V. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimental et modélisation théorique. PhD Thesis, INSA Lyon, France, 2005.
- [CHA 11] Chamoin J, Collet F, Pretot S, Lanos C. Réduction du pouvoir absorbant de chènevottes par traitement imperméabilisant, *EDP Sciences*, 99(6), 633–641, *Matériaux & Techniques* 2011.
- [EIR 06] Eires R, Nunes P, Fanguero R, Jalali S, Cameos A. New eco-friendly hybrid composite materials for Civil construction. *European Conference on Composite Materials*. Biarritz, May, 2006.
- [ELF 08] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (« hempcrete ») manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials* ;22 (10):2116-2123, 2008.
- [KIO 05] Kioy S. Lime-hemp composites: compressive strength and résistance to fungal attacks. MEng dissertation, recalled in Appendix 1: Resistance to compression and stress-strain properties, In: Bevan Rand Woolley T, editors. *Hemp Lime Construction, A guide to building with hemp lime composites*, IHS BRE press, 2013. p. 101-104, University of Bath, 2005.
- [LEC 15] Lecompte T, Picandet V, Tronet P, Baley C, Study of lime and hemp concrete (LHC) – mix design, casting process and mechanical behaviors, *ICBBM*, Clermont Ferrand, France, , 2015.
- [MUN 13] Munoz P, Pipet D, Plant-based Concretes in structures: Structural aspect-addition of a wooden support to absorb the strain, In: Amziane S, Arnaud L, editors. *Bio-aggregate-based Building Materials*. London/Hoboken: 267-287, ISTE/Wiley, 2013.
- [NGU 09a] Nguyen TT, Picandet V, Carré P, Lecompte T, Amziane S, Baley C. Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete;13:1039-1050, *EJECE* 2009.
- [NGU 09b] Nguyen TT, Picandet V, Amziane S, Baley C. Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete;13:1039-1050, *EJECE* 2009.
- [NGU 10] Nguyen TT. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, PhD thesis, Université de Bretagne-Sud, 2010.
- [NOZ 12] Nozahic V, Amziane S, Torrent G, Saïdi K, De Baynast H. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder *Cement and concrete composites* 2012, 34, 231-241.
- [PHA 14] Pham T.H., Modélisation multi-échelles des propriétés thermiques et élastiques de composites chaux-chanvre, PhD thesis, Université de Bretagne-Sud, 2014.
- [PIC 13] Picandet V. Characterization of Plant-Based Aggregates. In: Amziane S, Arnaud L, editors. *Bio-aggregate-based Building Materials*. London/Hoboken: ISTE/Wiley, 2013:27-73.
- [TRO 14a] Tronet P, Lecompte T, Picandet V, Baley C. Study of lime and Hemp composite precasting by compaction of fresh mix – A Fitted die to measure friction and stress state, *Powder Tech.*, 2014, 258:285-296.
- [TRO 14b] Tronet Pierre, Contribution à l'étude des matériaux chaux-chanvre: influence du compactage sur les propriétés, thèse, Université de Bretagne-Sud, 2010.