
Cisaillement au triaxial de bétons de chanvre : influence de la présence de fibres sur les réponses et propriétés mécaniques

Becquart Frédéric^{1,2,*}, Chabannes Morgan^{1,2}, Abriak Nor Edine^{1,2}

¹IMT Lille Douai, LGCgE–GCE, F-59508 Douai, France

²Université de Lille, F-59000 Lille, France

*Correspondant : frederic.becquart@imt-lille-douai.fr

RÉSUMÉ. L'étude du comportement mécanique en cisaillement des bétons végétaux reste très peu développée et d'intérêt ; en effet, tout en maintenant les performances d'isolation thermique, la recherche de formulations toujours plus performantes du point de vue des résistances mécaniques pose également la question de la prise en compte de la présence du béton végétal et de ses propriétés accrues dans le cadre d'un dimensionnement structurel des parois plus rationnel. Dans ce contexte, on s'intéresse dans ce papier à l'étude du comportement mécanique en compression triaxiale de cisaillement de bétons de chanvre formulés à base de chènevotte pure et de chènevotte fibrée. L'apport de fibres renforce la ductilité du béton de chanvre, cette ductilité étant d'autant plus importante que la contrainte moyenne effective croît. La présence de fibres contribue également à une meilleure résistance au cisaillement, atténuée quelque peu la rigidité et accroît l'angle de frottement au pic.

ABSTRACT. The study of the shear behavior of plant-based concretes remains very little developed and of interest; in fact, while ensuring a good insulation performance, the investigation of efficient mix designs from a mechanical point of view also raises the question of taking into account the presence of the bio-based concrete and its increased properties in the context of a more rational structural design of walls. In this paper, the mechanical behavior of hemp concretes designed with raw shives and fibrous shives under triaxial loading is studied. The presence of fibers reinforces the ductility of hemp concrete, this ductility being all the more significant as the effective mean stress increases. The presence of fibers also contributes to a better shear strength, somewhat reduces the stiffness and increases the peak friction angle.

MOTS-CLÉS : Cisaillement, béton végétal, compression triaxiale, chènevotte, fibres de chanvre, ductilité, frottement.

KEY WORDS: Shear loading, plant-based concretes, triaxial compression, hemp shiv, hemp fibers, ductility, friction.

1. Introduction - Contexte d'étude

Les bétons végétaux sont aujourd'hui considérés comme des matériaux isolants, qu'ils soient mis en place manuellement ou sous forme de blocs préfabriqués. Actuellement, à titre d'exemple, la conception structurale des murs de châssis en bois associés au béton de chanvre n'intègre aucune contribution du béton végétal. Pourtant, compte tenu de leurs propriétés mécaniques, il apparaît pertinent de considérer que ces bétons à base végétale pourraient contribuer à la performance mécanique de la structure. En particulier, certains auteurs [MUN 13, MUK 12] ont montré que le béton de chanvre fournit une résistance au contreventement dans le plan du cadre en bois. Selon Munoz et Pipet [MUN 13], le comportement mécanique d'un cadre en bois avec remplissage de béton de chanvre est amélioré par rapport à une structure avec barre de contreventement et dépourvue de béton végétal. La structure en bois incorporant le béton végétal présente une rigidité, une résistance au contreventement et une capacité de déformation plus élevées. Gross et Walker [GRO 12, GRO 14] ont étudié la résistance au contreventement d'un cadre bois rempli avec du béton de chanvre de faible densité (320 kg.m^{-3}). Ces auteurs ont conclu que même avec une faible résistance (la résistance à la compression était d'environ 0,4 MPa après 5 mois), le béton de chanvre mis en place manuellement améliore les performances de résistance au contreventement de la structure.

Dans ce contexte, l'étude expérimentale du comportement mécanique en cisaillement triaxial permet d'approcher les réponses et paramètres mécaniques caractérisant le comportement du béton de chanvre sous ce type de sollicitations. Sur la thématique biosourcée de nature végétale, outre l'aspect éco-formulation développé, le Département Génie Civil et Environnemental de l'IMT Lille Douai s'intéresse en particulier au comportement physico-mécanique des bétons végétaux sous sollicitations mécaniques (compressions simple, œdométrique, et triaxiale notamment). On présente dans ce papier le comportement mécanique sous cisaillement triaxial de bétons de chanvre d'anas purs et d'anas de chanvre fibrés. Les réponses déviatoriques sont analysées et discutées. L'évaluation des paramètres mécaniques (module d'Young, angle de frottement, cohésion) des deux types de bétons de chanvre, non fibré et fibré, est relatée.

2. Etude expérimentale

Les bétons de chanvre formulés dans la présente étude sont de deux natures : le béton de chanvre d'anas pur, noté *LHC-S0*, et le béton de chanvre d'anas fibrés (20% en volume), noté *LHC-S20*. Les deux types d'anas proviennent de Technichanvre® (Riec-sur-Bélon, France) avec une granulométrie comparable. Le Tradical®PF70 (Lhoist) est utilisé comme liant. Il est composé à 80% en volume de chaux aérienne.

2.1 Dosage des constituants, fabrication et cure des éprouvettes

Le tableau 1 explicite la composition des bétons *LHC-S0* et *LHC-S20*. Les éprouvettes ont un élancement de 2 et un diamètre de 10 cm. Les bétons végétaux ont été mis en place par vibrocompaction pour atteindre les masses volumiques à l'état frais et l'état stabilisé présentés dans le tableau 1, en ambiance climatique maintenue à une température $T = 23^\circ$ et une humidité relative $HR = 65\%$ pendant 60 jours et jusqu'à la réalisation des tests de compression triaxiale.

Tableau 1. Composition des formulations de bétons de chanvre non fibrés *LHC-S0* et fibrés *LHC-S20*

Ratio massique		Proportions massiques des constituants (kg.m^3)			Masse volumique des bétons (kg.m^3)	
Liant/Granulat	Eau/Liant	Granulat	Liant	Eau	Etat frais	Etat stabilisé
2,3	0,8	190	435	350	975	700

2.2 Programme expérimental

Un dispositif triaxial classique a été adapté pour la réalisation de tests de compression triaxiale de cisaillement sur les bétons de chanvre. Les tests triaxiaux ont été réalisés en condition drainée à la pression atmosphérique et sont contrôlés en déplacement, à la vitesse de $0,4 \text{ mm.min}^{-1}$.

Plusieurs pressions effectives de confinement initiales sont étudiées : $p'_0 = 25 ; 50 ; 100$ et 150 kPa . Pour chaque pression, plusieurs éprouvettes sont testées (3 voire 4) afin d'évaluer la répétabilité des réponses sous un même chargement.

2.3 Résultats expérimentaux : analyses et discussion

Les résultats expérimentaux en compression uniaxiale et compression triaxiale mettent clairement en évidence la ductilité des bétons de chanvre (figure 1 et figure 2). Cette ductilité est d'autant plus prononcée avec la présence de fibres au sein du béton végétal. En compression axiale simple, le pic de rupture est atteint pour une déformation axiale de l'ordre de 6% pour le béton de chanvre non fibré, contre 12,5% pour le béton de chanvre fibré. Sous compression triaxiale, la ductilité présente une dépendance vis-à-vis de la contrainte effective moyenne appliquée. Sous $p'_0 = 50$ kPa, le pic de rupture est atteint pour une déformation axiale de l'ordre de 12% pour le béton de chanvre non fibré, contre 20% pour le béton de chanvre fibré.

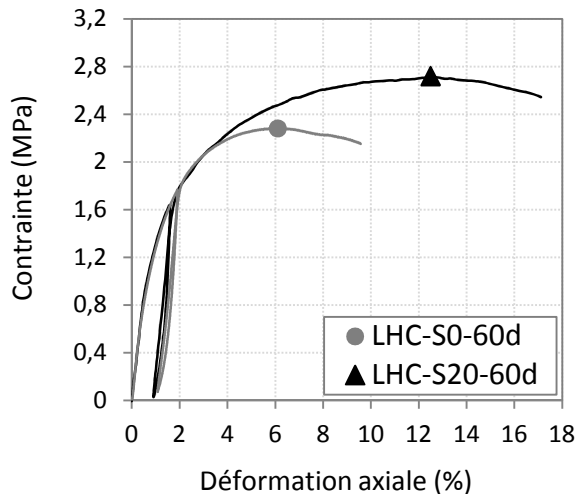


Figure 1. Compression uniaxiale à 60 jours de cure

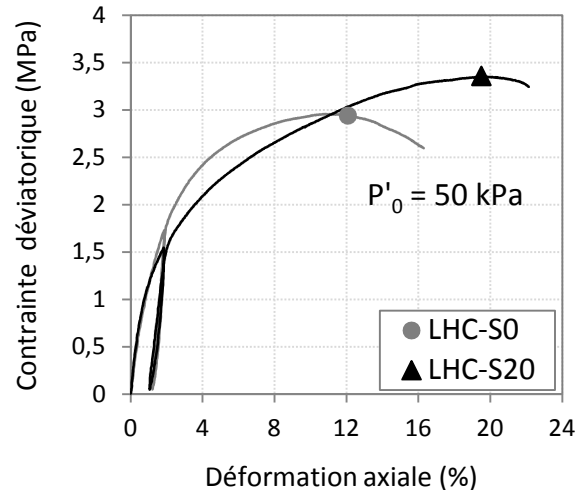


Figure 2. Compression triaxiale à 60 jours de cure sous $p'_0 = 50$ kPa

Les contraintes à rupture en compression simple pour les bétons *LHC-S0* et *LHC-S20* sont respectivement de l'ordre de 2,5 MPa et de 2,7 MPa en moyenne ; l'arrangement granulaire et la densification du matériau obtenu par vibrocompactage permettent d'atteindre un niveau de performance mécanique à 60 jours plus élevé que les standards. Les modules de rigidité sécants estimés à 2% de déformation pour les deux types de bétons *LHC-S0* et *LHC-S20* sont de l'ordre de 208-264 MPa et de 177-239 MPa ; on note une légère diminution de la rigidité en présence de fibres pouvant s'expliquer entre autres par un mode de rupture plus différencié (effet matelassé dans la partie basse de l'éprouvette fibrée, comme explicité sur la figure 4).

Tableau 2. Propriétés et résultats mécaniques des bétons de chanvre vibrocompactés *LHC-S0* et *LHC-S20*

Béton	R_{C-60d} (MPa)	$E_{CYC-60d}$ (MPa)	ρ_{60d} (kg.m ⁻³)
LHC-S0	2,47 ± 0,23	236 ± 28	697 ± 4
LHC-S20	2,66 ± 0,14	208 ± 31	701 ± 7

Les figures 3 et 4 illustrent les éprouvettes avant et après essais de compression triaxiale de cisaillement. Le tableau 3 explicite les valeurs des déviateurs et de la contrainte moyenne au pic de rupture, avec le niveau de déformation associée, suivant la contrainte moyenne initiale appliquée. Naturellement et pour chacun des bétons *LHC-S0* et *LHC-S20*, la résistance au cisaillement augmente avec la contrainte moyenne initiale p'_0 , allant jusqu'à plus de 3,5 MPa pour une contrainte moyenne effective $p'_0 = 150$ kPa. La présence de fibres induit une résistance au cisaillement plus accrue que pour le béton de chanvre d'anas pur. Par ailleurs, plus la contrainte moyenne initiale p'_0 augmente, plus la rupture au pic est décalée avec l'augmentation de la déformation axiale ; ce décalage s'accroît avec la présence de fibres, marquant une ductilité plus prononcée. Une estimation de l'angle de frottement au pic est calculée dans le diagramme $\{q-p'\}$; une valeur de φ_{pic} de 46° est obtenue pour le béton *LHC-S0* contre 52° pour le béton *LHC-S20*, avec respectivement des cohésions de l'ordre de 0,35 MPa et 0,29 MPa. L'apport de fibres induit une augmentation conséquente de l'angle de friction à la rupture du béton de chanvre et une légère baisse de la cohésion.

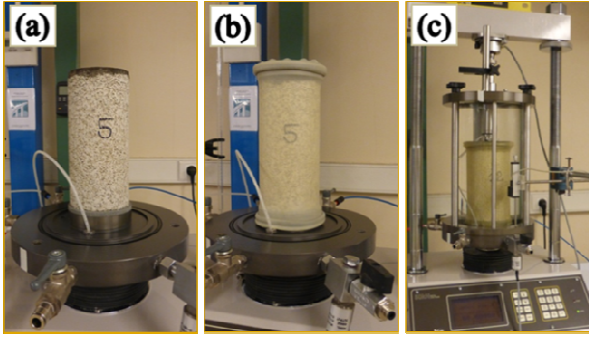


Figure 3. Montage d'un échantillon : (a) Échantillon sur embase avant compression (b) Étanchéité par membrane latex et joints toriques (c) Échantillon prêt pour essai



Figure 4. Modes de rupture des éprouvettes. n°30 peut être observé sur LHC-S0 et n°13 sur LHC-S0 et LHC-S20

Tableau 3. Paramètres mécaniques au pic de rupture des réponses déviatoriques

p'_0 (kPa)	LHC-S0			LHC-S20		
	q_{pic} (MPa)	p'_{max} (MPa)	ϵ_{pic} (%)	q_{pic} (MPa)	p'_{max} (MPa)	ϵ_{pic} (%)
0	2,47	0,82	5,3	2,66	0,89	11,8
25	2,72	0,93	9,6	2,77	0,95	15,2
50	2,82	0,99	11,4	3,29	1,15	19,5
100	3,07	1,13	19	3,51	1,27	20
150	3,26	1,24	19,1	3,62	1,36	23,6

Tableau 4. Friction au pic et cohésion des bétons de chanvre LHC-S0 et LHC-S20

	ϕ_{pic} (°)	Cohésion C (MPa)
LHC-S0	46	0,35
LHC-S20	52	0,29

3. Conclusions

Cette étude expérimentale sur le comportement mécanique sous cisaillement triaxial de bétons de chanvre non fibrés et fibrés a permis de mettre en évidence l'influence de la présence de fibres sur la réponse déviatorique, avec une ductilité plus marquée et accentuée avec la contrainte effective moyenne appliquée, et une résistance au cisaillement plus accrue pour le béton de chanvre fibré. La rigidité des bétons de chanvre fibrés semble plus affectée et dépendante du mode de rupture, avec un effet plus matelassé mis en évidence. Les tests triaxiaux de cisaillement conduits en condition drainée sous plusieurs contraintes effectives moyennes initiales ont permis de fournir une estimation de l'angle de frottement à rupture, de l'ordre de 46° pour le béton de chanvre non fibré contre 52° pour le béton de chanvre fibré. La ductilité des bétons de chanvre est telle qu'il est difficile expérimentalement d'atteindre un palier d'écoulement aux grandes déformations.

4. Bibliographie

- [MUN 13] MUNOZ P., PIPET D., "Plant-based concretes in structures: structural aspect-addition of a wooden support to absorb the strain", in S. Amziane, L. Arnaud. *Bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes*, WILEY-ISTE, 2013.
- [MUK 12] MUKHERJEE A., "Structural benefits of hempcrete infill in timber stud walls". Queen's University (MSc.), 2012.
- [GRO 14] GROSS C., WALKER P., "Racking performance of timber studwork and hemp-lime walling", *Construction and Building Materials*, 66, 429-435, 2014.
- [GRO 12] GROSS C., "Structural enhancement of timber framing using hemp-lime", PhD thesis of University of Bath, 2012.