
Étude expérimentale des propriétés d'un béton de chanvre incorporant un adjuvant viscosant

Jonathan Page¹, Mohammed Sonebi², Sofiane Amziane³

1. ESITC Caen, Université de Caen Normandie
1 rue Pierre et Marie Curie, 14610 Epron, France
jonathan.page@esitc-caen.fr

2. School of Natural and Built Environment, Queen's University Belfast
University Road, Belfast BT7 1NN, Northern Ireland, UK

3. Institut Pascal, Clermont Université UMR 6602,
2 avenue Blaise Pascal, 63178 Aubière, France

RÉSUMÉ. La faible résistance mécanique des bétons végétaux est en partie due à la forte absorption d'eau de la chènevotte et à la mauvaise adhérence granulats/liant minéral. Ce travail explore une nouvelle voie pour l'amélioration de cette interface basée sur une modification spécifique du liant avec un viscosant. Quatre formulations différentes ont été étudiées, correspondant à quatre applications différentes : enduit extérieur, mur coulé en place, isolation de sol, isolation de toiture. La stratégie mise en place a permis l'élaboration d'un béton de chanvre dont les propriétés mécaniques sont significativement améliorées par l'ajout de viscosant. Par ailleurs, l'ajout de ce viscosant n'entraîne aucune augmentation de la conductivité thermique. Les résultats mettent également en évidence une efficacité accrue de ce viscosant quand le ratio chènevotte/liant augmente.

ABSTRACT. The low mechanical strength of bio-aggregate-based concretes is mainly due to the high water absorption of hemp shives and the poor aggregate – mineral binder adhesion. A new way of approach to improve this interface is the use of a viscosity-modifying admixture (VMA). Four different mixes were made for: shuttered wall, external rendering, floor insulation and roof insulation. The setting up strategy enabled the elaboration of hemp concrete with improved mechanical properties due to an addition of 1% VMA in the binder. This VMA did not increase the thermal conductivity of the composite. The results also highlighted an increased efficiency of the viscosity with mixes containing a high hemp shiv / binder ratio.

MOTS-CLÉS : béton de chanvre, viscosant, absorption d'eau, propriétés mécaniques, conductivité thermique.

KEYWORDS: hemp concrete, viscosity-modifying admixture, water absorption, mechanical properties, thermal conductivity.

DOI:10.3166/RCMA.26.349-366 © Lavoisier 2016

Extended abstract

From hemp is extracted shiv, which is mostly used as litter for animals thanks to its absorbent properties (Bouloc, 2006). But the shives may have a different destiny. Mixed with binders (lime and/or cement) and water, it can be used to make a hemp concrete. Currently, hemp concrete is most frequently used in lining or filling to form a construction element having good thermal and sound insulation without structural contribution. Most published research is focused on its thermal and hygrometric properties which result from the highly porous structure of the hemp shives (Evrard et De Herde, 2010; Tran Le *et al.*, 2010). However, its mechanical properties have also been the subject of several studies (Cérézo, 2005; Nguyen *et al.*, 2009; Sonebi *et al.*, 2015). Generally, hemp concrete compressive strength remained relatively low compared to conventional building materials, often less than 1 MPa.

Hemp shiv ultra-lightweight concretes are more and more used in European countries for their coupled insulation, mechanical and transfer properties. The low mechanical strength of bio-aggregate-based concretes is mainly due to the high water absorption of hemp shives and the poor aggregate – mineral binder adhesion. A new way of approach to improve this interface is the use of a viscosity-modifying admixture (VMA). Use of VMA as an admixture was carried out for two main reasons. Firstly for its ability to increase the water retention of the binder in order to reduce the gauging water migration to hemp shives (Patural *et al.*, 2011). The second is the ability of this admixture to increase the gauging water viscosity. Four different mixes were made for: shuttered wall, external rendering, floor insulation and roof insulation.

In first stage, the water absorption of hemp shiv was measured. Then the compressive strengths of these four mixes were then determined to compare the mechanical behaviour of hemp concrete with and without VMA. The rigidity of hemp concretes was also studied with cyclic compressive tests in order to measure the Young's modulus of the composites. Finally, the coefficient of thermal conductivity of these materials was measured.

Using this viscosity-modifying admixture has allowed to significantly increase the compressive strength of hemp concrete. The results also highlighted an increased efficiency of the viscosity with mixes containing a high hemp shiv / binder ratio. VMA also increases the rigidity of hemp concretes because an increase of approximately 15% of the modulus of elasticity was measured. This VMA did not increase the thermal conductivity of the composite.

1. Introduction

Du chanvre est extrait la chènevotte, qui est la plupart du temps utilisé comme litière pour animaux grâce à ses propriétés absorbantes (Bouloc, 2006). Cependant, la chènevotte peut avoir un autre usage. En effet, mélangée avec des liants (chaux et/ou ciment prompt) et de l'eau, elle peut servir à réaliser un béton de chanvre. Ce nouveau matériau n'est utilisé que depuis une vingtaine d'années dans la

construction en France. Depuis une dizaine d'années, de nombreuses recherches ont été faites sur ce matériau, ce qui a permis de mieux comprendre son comportement mécanique et hygrothermique (Amziane et Sonebi, 2015). Malgré cela, son utilisation reste toujours très marginale : 0,15 % de la consommation de matériau en France (Bewa, 2007). Cela est en partie dû à une méconnaissance de ce produit par le grand public et une méfiance de la part des professionnels. Ces inquiétudes vis-à-vis de ce matériau pourraient être corrigées si la preuve était faite que le béton de chanvre est un matériau aussi efficace et durable que ses concurrents sur le marché.

Actuellement, le béton de chanvre est utilisé la plupart du temps en doublure ou en remplissage pour former un élément de construction présentant une bonne isolation thermique et phonique, sans contribution structurelle (Amziane et Sonebi, 2016). La plupart des recherches publiées ont porté sur ses qualités thermiques et hygrométriques qui résultent de la structure très poreuse de la chènevotte (Evrard et De Herde, 2010 ; Tran Le *et al.*, 2010). Au niveau mécanique, la résistance en compression du béton de chanvre reste relativement faible par rapport aux autres matériaux de construction conventionnels, souvent inférieure à 2 MPa (Cérézo, 2005). La résistance en compression du béton de chanvre dépend du dosage en liant dans la formulation ; elle peut être améliorée en optimisant ce dosage (Chamoin, 2013). Le compactage du béton de chanvre pendant sa mise en œuvre a également une influence sur la résistance en compression (Nguyen *et al.*, 2009). Plus le compactage du béton est élevé, plus la densité du matériau augmente, entraînant une augmentation de la résistance en compression, mais également une diminution des performances thermiques.

La très faible masse volumique apparente de la chènevotte, liée à la structure alvéolaire de la tige dont elle est issue, donne au béton de chanvre une légèreté importante et une faible conductivité thermique. Cependant, cette structure se traduit aussi par une faible résistance et une faible rigidité du matériau après durcissement (Nguyen, 2010). Cette structure alvéolaire poreuse confère à la chènevotte un très fort pouvoir d'absorption d'eau ; parfois supérieur à 300 % en masse (Nozahic *et al.*, 2012). Cette forte absorption d'eau a pour effet de diminuer l'eau disponible pour le liant afin que la prise puisse se faire. De plus, cette migration de l'eau par capillarité entraîne une migration des ions calcium Ca^{2+} , nécessaires à la prise du liant, vers les particules végétales (Sedan *et al.*, 2008). Ainsi, dans le but de remédier à ce problème, de nombreux auteurs ont proposé des traitements à appliquer aux granulats. Ces traitements peuvent être de diverse nature : traitement chimique (NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etc.), traitement thermique (rétification), enrobage (huile de lin, ciment, chaux, etc.) (Le Troedec *et al.*, 2008 ; Nozahic et Amziane, 2012 ; Sedan *et al.*, 2007). Une autre solution pourrait consister à utiliser un adjuvant adéquat afin de limiter la migration de l'eau vers la chènevotte. Le choix du viscosant comme adjuvant a été effectué pour deux principales raisons. Tout d'abord pour sa capacité à augmenter la rétention en eau du liant afin de limiter la migration de l'eau de gâchage vers les granulats de chanvre (Patural *et al.*, 2011). La seconde est la capacité de cet adjuvant à augmenter la viscosité de l'eau de gâchage ; ceci devrait diminuer la capacité d'absorption de cette eau par capillarité et de diffusion dans les granulats. Dans une étude récente, Nozahic a montré que l'ajout d'éther de cellulose,

qui est également utilisé comme agent de viscosité, permet d'améliorer significativement la résistance en compression des bétons de végétaux (Amziane *et al.*, 2015).

Ce travail propose une autre solution pour limiter d'une part la migration de l'eau vers la chènevotte et, d'autre part, réduire la mobilité ionique du végétal vers le liant minéral, tout cela par une adjuvantation spécifique du liant à l'aide d'un viscosant. Quatre formulations différentes ont été étudiées, chacune pour une application spécifique : enduit extérieur, mur coulé en place, isolation de sol et isolation de toiture. Leurs propriétés mécaniques ont pu être étudiées à travers des essais de compression simple sur éprouvettes cubiques et d'essais de compression cycliques sur cylindres. Pour finir, la conductivité thermique des bétons de chanvre a pu être mesurée selon la méthode du fil chaud afin de savoir si l'adjuvant a une influence sur les propriétés thermiques des agro-bétons.

2. Matériaux et formulations

2.1. Matériaux utilisés

La chènevotte utilisée lors de cette étude est le chanvre Tradical® HF. Ce granulats de chanvre provient de la partie ligneuse de la tige de chanvre. Le chanvre est passé par les étapes de broyage, criblage et épuration afin d'obtenir la chènevotte. Ce type de chènevotte est compatible avec des liants à base de chaux et est commercialisé pour la construction de maison individuelle en béton de chanvre (figure 1).



Figure 1. Granulat de chanvre utilisé

Le liant Tradical® PF70 a été utilisé pour ce travail. Il a déjà été employé dans plusieurs autres recherches portant sur le béton de chanvre (Boutin *et al.*, 2006 ; Chamoin, 2013 ; Evrard et De Herde, 2010 ; Nguyen, 2010). Tradical® PF70 est un liant préformulé à base de chaux aérienne (75 %), de liants hydrauliques (15 %) et pouzzolanique (10 %).

Le viscosant utilisé est une solution aqueuse de copolymère synthétique de masse moléculaire élevée. Il a été utilisé dans une proportion massique de 1 % par rapport au liant. Ce viscosant possède un fort pouvoir de rétention d'eau. C'est justement cette forte aptitude à l'absorption d'eau qui nous intéresse, ce qui devrait permettre de limiter le transfert d'eau du ciment aux particules de chanvre.

2.2. Méthodologie

2.2.1. Formulations

Quatre utilisations différentes du béton de chanvre ont été étudiées. Elles proviennent des règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre (Construire en Chanvre, 2012). Ces formulations sont les suivantes : enduit extérieur (mix E), murs (mix M), isolation de sol (mix S) et isolation de toiture (mix T) (figure 2).

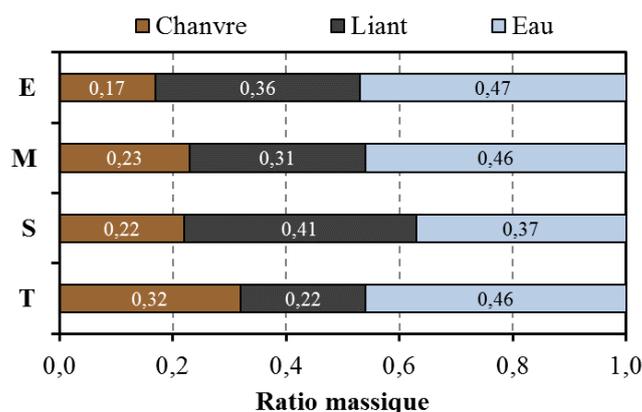


Figure 2. Proportions massiques des constituants

Amziane et Arnaud (2013) ont proposé des dosages de béton de chanvre, basés sur l'expérience, pour chacune des quatre applications. Les dosages et notations utilisées sont présentés dans la figure 2. Deux bétons de chanvre différents ont été formulés pour cette étude. Le premier est un béton de chanvre conventionnel. Il sera par la suite abrégé « Ref ». Le second est également un béton chanvre, mais dans lequel a été ajouté un adjuvant viscosant, avec un dosage égal à 1 % de la masse de liant, qui sera abrégé « VMA » pour *Viscosity-Modifying Admixture*.

2.2.2. Méthode de malaxage

L'une des principales difficultés rencontrées lors du malaxage du béton de chanvre est l'absorption d'eau des granulats de chanvre. Étant donné les problèmes posés par cette absorption d'eau, il est nécessaire d'en tenir compte lors du malaxage. Plusieurs auteurs recommandent un prémouillage de la chènevotte avant d'introduire le liant (Nguyen, 2010 ; Sonebi *et al.*, 2015).

Ainsi, pour permettre un prémouillage, la chènevotte a d'abord été malaxée à sec pendant 30 secondes. Ensuite, 65 % de l'eau totale a été ajoutée, pendant 1 minute et 30 secondes. Puis, le liant a été ajouté, suivi d'un malaxage d'une minute. Pour finir, la quantité d'eau restante (35 %) a été introduite dans le bol, pour une dernière séquence de malaxage de 2 minutes. Le temps total de malaxage est de 5 minutes.

2.2.3. Fabrication des échantillons et conditions de cure

Des cubes de 50 x 50 x 50 mm ou 100 x 100 x 100 mm, ainsi que des cylindres Ø100 x 200 mm, ont été fabriqués afin de réaliser les différents essais. Ces échantillons ont été compactés manuellement en trois couches à l'aide d'un outil métallique. La première et la deuxième couches ont été grattées afin d'améliorer l'adhérence avec la couche supérieure. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après fabrication puis stockées dans une chambre de conservation à 20 ± 1 °C et 60 ± 5 % d'humidité relative.

2.3. Procédures expérimentales

2.3.1. Caractérisation de la chènevotte

2.3.1.1. Absorption d'eau de la chènevotte

De par leur structure poreuse, les particules de chanvre sont très sensibles à l'eau, c'est pourquoi leur cinétique d'absorption d'eau a été déterminée. Pour cela, les granulats ont été séchés à $50 \pm 0,1$ °C dans une étuve ventilée jusqu'à masse constante. Ensuite, 25 grammes de chanvre ont été placés dans des sachets micro-perforés. Ces sachets ont ensuite été immergés dans l'eau pendant plusieurs durées (de 1 minute à 24 heures). L'essai a été répété trois fois pour chaque durée. Après immersion, les sachets ont été placés dans uneessoreuse (100 tours à une vitesse de 2 trs. sec^{-1}) afin de retirer l'eau en excès à la surface des particules. L'absorption d'eau a donc pu être déterminée à partir des pesées successives des sachets avec et sans chènevotte, avant et après immersion. Ce protocole a été mis au point par le comité technique RILEM TC-236 BBM (Amziane et Collet, 2016a).

2.3.1.2. Caractérisation granulométrique du chanvre par analyse d'image.

Plusieurs études ont montré que l'analyse d'image est la méthode la plus efficace pour caractériser la granulométrie de la chènevotte (Nguyen, 2010 ; Nozahic *et al.*, 2012). En effet, du fait de la forme élancée de ces particules, la granulométrie par tamisage mécanique est inappropriée (Igathinathane *et al.*, 2009). Toutefois, dans le but de comparer avec les résultats d'analyse d'image, un tamisage mécanique du

chanvre a été réalisé selon la norme EN 933-2. Le protocole pour le chanvre a été adapté selon les recommandations du comité RILEM TC-236 BBM (Amziane et Collet, 2016b).

L'analyse d'image a été réalisée à l'aide du logiciel ImageJ. Ce logiciel utilise la méthode dite de *best fitting ellipse* pour calculer des paramètres morphologiques, tels que les axes majeur et mineur (figure 3). Trois différents échantillons aléatoires d'au moins 2000 particules ont été placés sur une feuille de papier noir. Ensuite l'acquisition digitale a été traitée avec le logiciel. Les paramètres morphologiques sélectionnés pour l'analyse sont les suivants :

- Axes majeur et mineur : respectivement le plus grand et le plus petit axe de l'ellipse ajustée.
- Aire (A) : surface de la particule, mesurée avec le nombre de pixels.
- Périmètre (P) : contour en pixels de l'objet.
- Diamètre équivalent (DE) : diamètre de la sphère de même aire que la particule, définit par :

$$\text{Diamètre équivalent} = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (1)$$

- Élongation : rapport entre l'axe majeur et l'axe mineur.
- Circularité : sa valeur varie de 0 (particule infiniment allongée) à 1 (sphère parfaite), et est calculée comme suit :

$$\text{Circularité} = 4\pi \times \frac{A}{P^2} \quad (2)$$

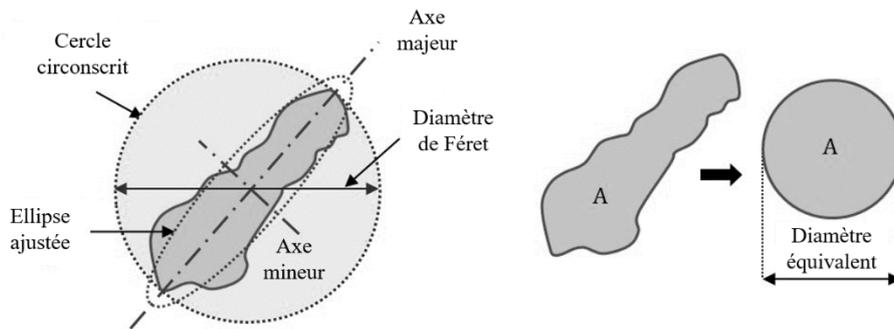


Figure 3. Définition des paramètres géométriques calculés

2.3.2. Caractérisation des bétons de chanvre

2.3.2.1. Essai de compression

La résistance en compression des différents bétons de chanvre a été mesurée après 28 jours de cure sur des cubes 50 x 50 x 50 mm, à l'aide d'une presse électromécanique d'une capacité de 50 kN, à une vitesse de déplacement de 3 mm/min. Pour les cylindres, un chargement cyclique a été réalisé avec une précharge égale à 200 N. Trois cycles ont été réalisés avec des chargements jusqu'à 1, 2 et 3 % de déformation relative.

2.3.2.2. Essai de conductivité thermique

La conductivité thermique des différents bétons de chanvre a été mesurée avec un conductivimètre (NeoTIM), en utilisant la méthode du fil-chaud. Ce principe de sonde et de dispositif a été développé par le CSTB, et dérive également de la norme ASTM D5930-97 et de la recommandation RILEM AAC 11-3. Les mesures sont effectuées en positionnant la sonde fil-chaud entre deux échantillons de la même formulation (figure 4). Avant l'essai, les éprouvettes ont été séchées 48 h à 40 °C et ont été sorties une heure avant la mesure. Le protocole pour le chanvre a été adapté selon les recommandations du comité RILEM TC-236 BBM (Amziane et Collet, 2016c).

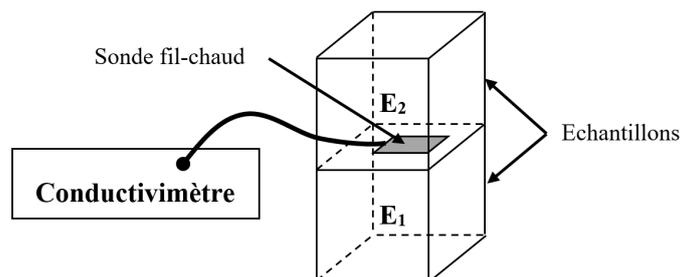


Figure 4. Méthode de mesure de la conductivité thermique des échantillons

3. Résultats et discussion

3.1. Caractéristiques de la chènevotte

3.1.1. Absorption d'eau

La courbe d'absorption en eau de la chènevotte a une allure similaire à celles reportées dans les précédentes études réalisées sur ce matériau (Cérézo, 2005 ; Chabannes *et al.*, 2014 ; Nguyen, 2010). On peut y observer deux phases d'absorption (figure 5). La première est une phase d'absorption de surface qui provoque une augmentation très rapide de la masse des granulats de chanvre (1 minute environ). Ce comportement souligne le caractère fortement hygrophile de ces

particules végétales. La deuxième phase correspond à une plus lente absorption d'eau dans la structure végétale. Ceci illustre le comportement diffusif de la propagation de l'eau dans la structure végétale dans le plus long terme, ici jusqu'à 48 heures.

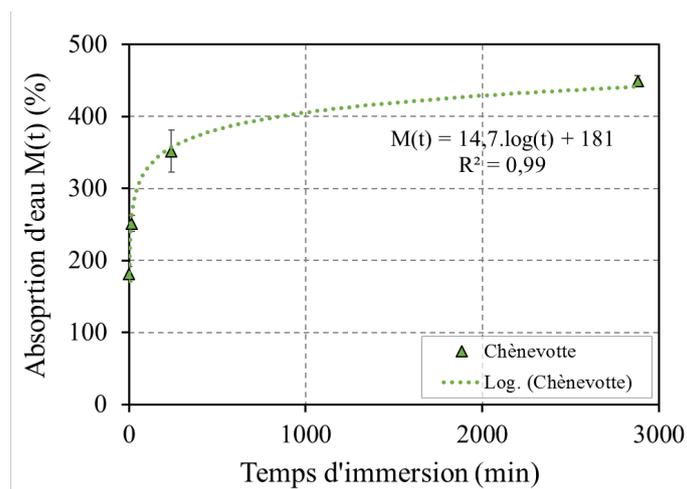


Figure 5. Gain massique par absorption d'eau des granulats de chanvre

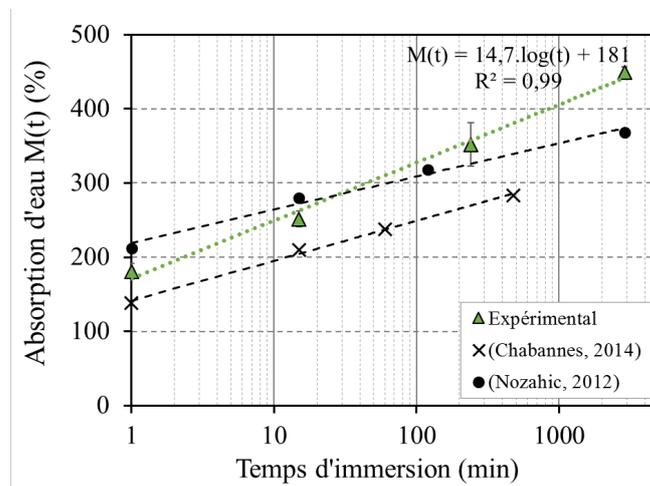


Figure 6. Absorption d'eau de la chènevotte en fonction du temps sur une échelle logarithmique

La phase de mouillage peut être considérée comme terminée après 1 minute. L'absorption initiale a été fixée pour cette durée d'immersion et est égale à 181 %. On peut voir sur la figure 6 que l'absorption d'eau des particules végétales suit une loi de type logarithmique. On note que l'absorption d'eau peut dépasser les 400 % après 24 heures d'immersion. Cette forte capacité d'absorption de la chènevotte a un rôle significatif dans la formulation et la mise en œuvre du béton de chanvre. Cette propriété hydrophile des particules végétales influence la prise du liant (Nguyen, 2010). En effet, la chènevotte et le liant seront en compétition pour mobiliser l'eau, ce qui peut par la suite altérer l'hydratation de celui-ci.

3.1.2. Répartition granulométrique

La granulométrie par tamisage est l'essai de référence pour caractériser les granulats minéraux. Pour les granulats lignocellulosiques, cette technique est inadaptée car elle ne prend pas en compte l'élongation des particules (Igathinathane *et al.*, 2009). Dans la figure 7, la répartition granulométrique de la chènevotte obtenue par tamisage mécanique est comprise entre 0,5 et 5 mm. Les particules longues (de 5 à 30 mm) n'apparaissent pas sur cette courbe. Seules l'épaisseur et la largeur des particules conditionnent le passage d'un tamis à un autre.

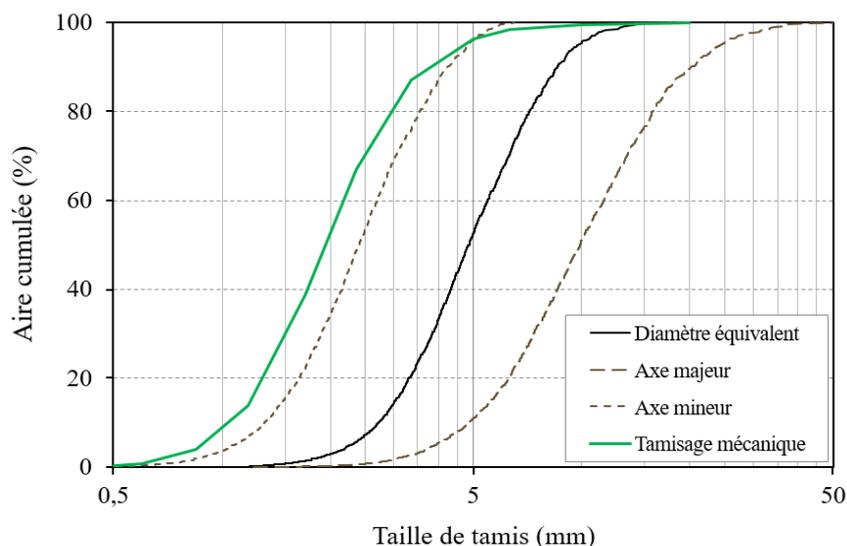


Figure 7. Courbes granulométriques de la chènevotte obtenues par analyse d'image et par tamisage mécanique

L'analyse d'image fournit des informations plus exhaustives. La figure 7 révèle, par rapport au tamisage mécanique, des différences significatives entre l'axe majeur et mineur, et le diamètre équivalent. Le diamètre équivalent médian est égal à 4,86 mm et l'écart entre la médiane $D(a, 0,5)$ et les axes mineur et majeur est égal à

7,49 mm. À première vue, cela reflète une grande hétérogénéité morphologique des granulats de chanvre. Cependant, ces valeurs sont cohérentes avec la littérature. Par exemple, Chabannes *et al.* (2014) ont trouvé avec leur chènevotte, un diamètre équivalent d'environ 5 mm et un écart entre la médiane et les axes majeur et mineur approximativement égal à 6,8 mm. Nozahic *et al.* (2012) ont trouvé pour ces deux paramètres, des valeurs respectivement égales à 4,2 mm et 6,2 mm.

Les paramètres dérivés de l'analyse d'image sont utilisés pour exprimer d'autres critères morphologiques comme l'élongation ou la circularité. L'élongation correspond dans ce cas à un ratio calculé à partir des dimensions des deux axes de l'ellipse (axes majeur et mineur). L'élongation des granulats de chènevotte suit une distribution de type log-normale (figure 8). On ne semble distinguer qu'une seule population de chènevotte, qui peut toutefois avoir une élongation supérieure à 10. Cette importante élongation ne favorise pas l'arrangement granulaire. La valeur médiane obtenue pour l'élongation est $3,82 \pm 2,33$.

La circularité des particules suit également une loi de type log-normale. La valeur médiane de la circularité est très faible, égale à $0,26 \pm 0,14$. Cela confirme la très grande élongation des granulats de chanvre.

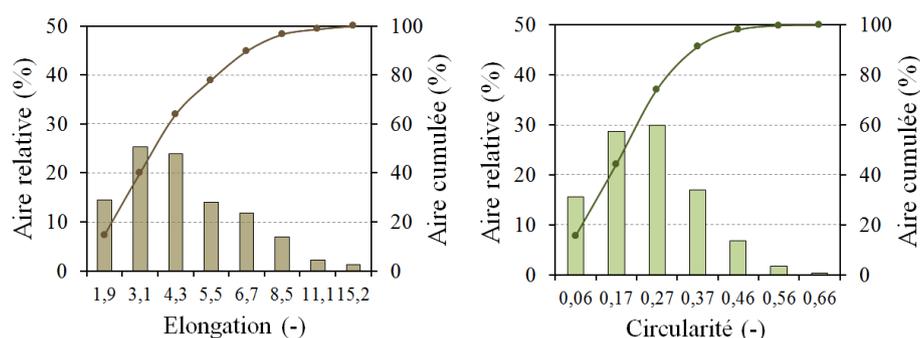


Figure 8. Élongation et circularité de la chènevotte

3.2. Caractéristiques des bétons de chanvre

3.2.1. Masse volumique des agro-bétons

La masse volumique apparente des bétons de chanvre est très faible comparée aux bétons traditionnels. Elle varie entre 250 et 500 kg.m⁻³ suivant la formulation. C'est justement cette faible densité qui confère au béton de chanvre ses bonnes performances thermiques. Cependant, la résistance mécanique et la densité sont également deux paramètres reliés. Ainsi, les faibles résistances mécaniques des agro-bétons sont également dues à leur faible densité.

Les densités apparentes obtenues sont très proches des valeurs observées dans la littérature (Cérézo, 2005 ; Chamoin, 2013 ; Nozahic *et al.*, 2012). On observe par

exemple une faible masse volumique apparente pour le mix T, utilisé en isolation de toiture, qui contient une forte proportion de chènevotte (figure 9). Les densités les plus élevées sont obtenues avec les mix E et S, qui contiennent une forte teneur en liant. Les masses volumiques apparentes du béton de chanvre référence et du béton de chanvre avec viscosant sont très proches, que ce soit à l'état frais ou à 28 jours. On note également une forte diminution de la densité apparente entre l'état frais et après 28 jours de cure, comprise entre 30 et 40 % en moyenne. Cette perte de masse est due à l'absorption d'eau des granulats lors du malaxage, qui va ensuite s'évaporer lentement durant la période de séchage du béton de chanvre. Le même ordre de grandeur de perte de masse a été observé dans d'autres travaux avec des formulations similaires (Chamoin, 2013).

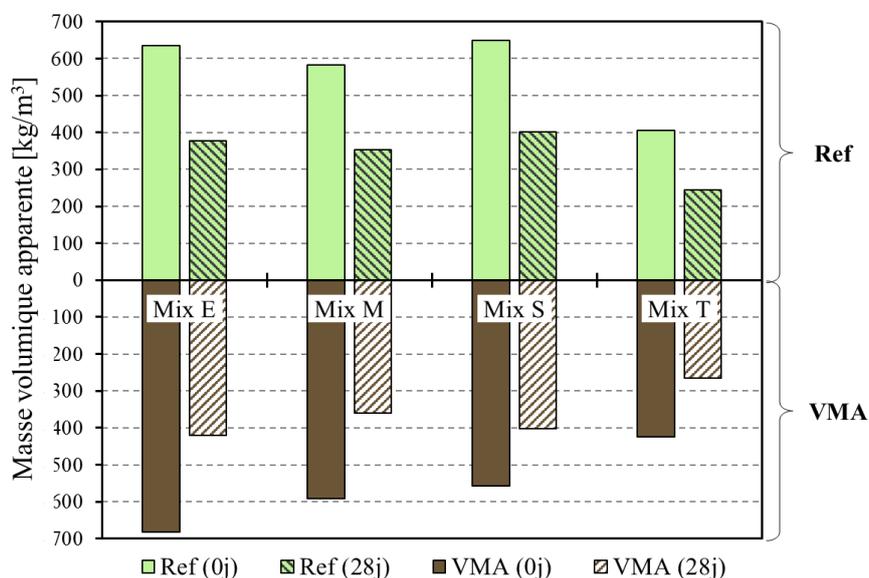


Figure 9. Masses volumiques apparentes des bétons de chanvre

3.2.2. Résistance en compression

Comme l'ont déjà souligné d'autres auteurs, les agro-bétons soumis à un effort de compression ont un comportement différent selon la direction de l'effort appliqué (Nozahic *et al.*, 2012). En effet, les particules de chènevotte ont tendance à s'orienter lors du compactage. Conventionnellement, les bétons de chanvre sont testés en compression avec une direction de l'effort appliqué parallèlement à la direction de compactage. La force de compression est alors dirigée perpendiculairement à la direction d'orientation des particules de chanvre. À l'inverse, lorsque l'essai de compression est réalisé perpendiculairement à la direction de compactage, les chènevottes sont davantage sollicitées longitudinalement, dans leur direction de plus grande rigidité.

Pour cette étude, les échantillons ont été testés avec un effort de compression appliqué parallèlement à la direction de compactage (figure 10). Dans cette configuration, le béton de chanvre a un comportement quasi linéaire, jusqu'à la fin de l'essai de compression, fixé à 12 % de déformation. La contrainte maximale n'est pas atteinte puisque le matériau continue de se déformer jusqu'à cette limite. Dans le but de pouvoir comparer les résultats entre eux, nous avons retenu les niveaux de contrainte obtenus pour une déformation de 5 %.

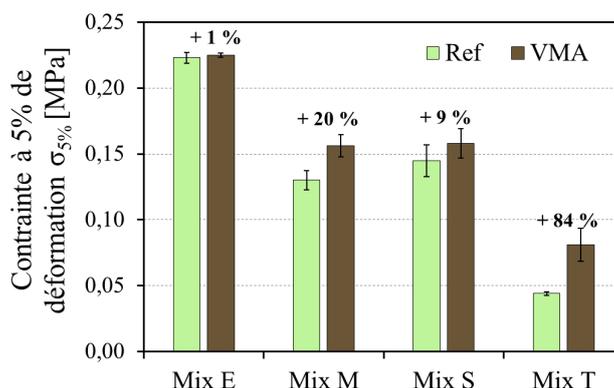


Figure 10. Résistance en compression obtenues pour les différentes formulations de bétons de chanvre

Comme on peut le voir sur la figure 10, la résistance en compression $\sigma_{5\%}$ du béton de chanvre avec viscosant (VMA) est supérieure au béton de chanvre sans adjuvant (Ref) pour la plupart des formulations. Pour les formulations E et S, qui possèdent un faible rapport C/L, l'apport du viscosant sur la résistance reste très faible : inférieur à 10 %. Cependant, pour les formulations M et T qui contiennent davantage de chanvre, le gain de résistance dû au viscosant est beaucoup plus important, respectivement 20 et 84 %.

Par ailleurs, on observe une relation linéaire entre le gain de résistance en compression des bétons VMA par rapport aux bétons Ref et le ratio chènevotte/liant de ces bétons de chanvre (figure 11). Ainsi, plus la quantité de chènevotte par rapport au liant est importante, plus le viscosant a un impact positif sur la résistance en compression du béton de chanvre.

3.2.3. Module d'élasticité

Le module d'Young des bétons de chanvre a été mesuré à partir des courbes contrainte/déformation obtenues pour des essais de compression avec chargement cyclique sur des éprouvettes cylindriques $\varnothing 100 \times 200$ ht mm âgées de 28 jours. Trois cycles de charge-décharge ont été réalisés à 1, 2 et 3 % de déformation relative. Le module d'Young a été mesuré sur chacune des trois pentes

correspondant aux trois cycles (figure 12). Afin de vérifier la reproductibilité des résultats, trois éprouvettes par formulation ont fait l'objet de cet essai. La mesure du module d'élasticité a été réalisée sur les formulations E et M correspondant respectivement à l'enduit extérieur et au mur banché.

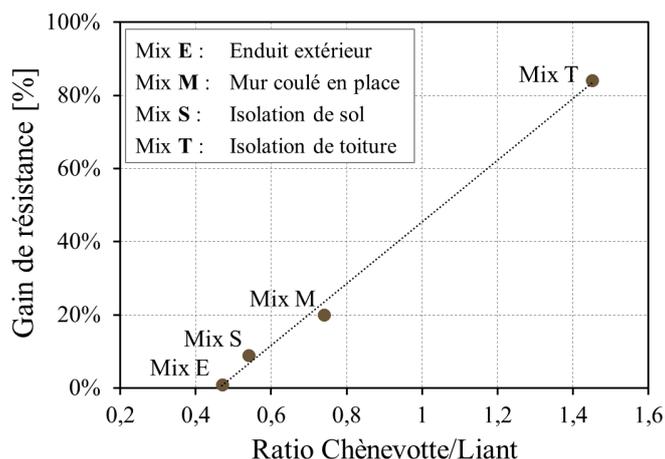


Figure 11. Gain de résistance en compression dû au viscosant en fonction du rapport chènevotte/liant

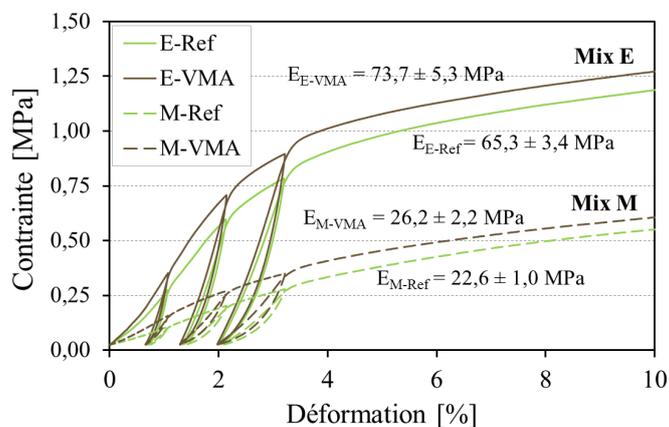


Figure 12. Courbes contrainte – déformation des bétons Ref et VMA soumis à des cycles de charge – décharge en compression

On note tout d'abord une grande différence pour la valeur du module d'élasticité entre les formulations E et M pour le béton de chanvre non adjuvanté : 65,3 MPa pour le mélange E et 22,6 MPa pour le mélange M. C'est un résultat attendu puisque la formulation E contient davantage de liant et moins de chanvre. Si l'on s'intéresse maintenant à l'effet du viscosant, on observe une augmentation du module d'Young pour le béton de chanvre adjuvanté, et ce pour les deux formulations E et M (figure 13). En effet, pour le béton adjuvanté, le module d'Young est égal à 73,7 MPa pour le mélange E (enduit extérieur), soit une augmentation de 13 %, et 26,2 MPa pour le mélange M (mur banché), soit + 16 %. Cette augmentation de la rigidité est le reflet d'une amélioration de l'interface liant/végétal. Nozahic a également noté que l'ajout d'un agent rétenteur d'eau (éther de cellulose) dans un béton à base de granulats végétaux (chanvre et tournesol) avait pour conséquence d'améliorer l'interface entre les granulats végétaux et le liant pouzzolanique, et donc d'augmenter la rigidité du matériau (Amziane *et al.*, 2015).

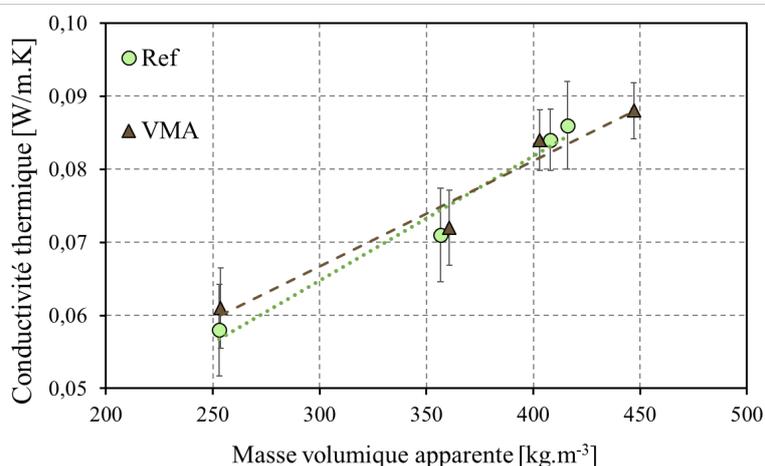


Figure 13. Conductivité thermique des bétons de chanvre en fonction de leur masse volumique apparente

3.2.4. Conductivité thermique

La grandeur la plus utilisée pour caractériser la performance thermique d'un matériau est la conductivité thermique. Celle-ci est fortement liée à la densité du matériau. Cette grandeur physique caractérise le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Plus la conductivité thermique d'un matériau est faible, plus celui-ci sera isolant. Le coefficient de conductivité thermique a été mesuré pour chacune des formulations de béton de chanvre.

On observe effectivement une relation linéaire entre la masse volumique des bétons de chanvre et la conductivité thermique, que ce soit pour les bétons Ref ou VMA. La conductivité thermique des différents bétons de chanvre est comprise

entre 0,05 et 0,09 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (figure 13). Ceci illustre bien la bonne capacité d'isolation du béton de chanvre. Par comparaison, la conductivité thermique du béton ordinaire est généralement comprise entre 1 et 2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Le béton de chanvre est donc entre 10 et 20 fois plus isolant que le béton ordinaire. On note que, comme attendu, l'ajout de viscosant dans le béton de chanvre n'a pas d'influence sur la conductivité thermique. On observe bien quasiment la même relation linéaire entre la densité et la conductivité pour les bétons adjvanté (VMA) et pour les bétons de chanvre témoins (Ref).

4. Conclusion

Le test d'absorption d'eau réalisé sur les granulats de chanvre a permis de montrer la très grande capacité d'absorption d'eau de la chènevotte : près de 450 % après 48 heures d'immersion. L'absorption d'eau des granulats végétaux semble suivre une loi logarithmique, avec une très forte absorption dans les premières minutes après immersion, puis une lente diffusion de cette eau dans du granulat durant les heures suivantes.

L'effet recherché en utilisant le viscosant était d'augmenter la rétention en eau du liant pouzzolanique afin de limiter l'absorption d'eau des granulats de chanvre et la diffusion des ions calcium nécessaire à la prise du liant. L'utilisation de ce viscosant a permis d'augmenter de manière significative la résistance en compression du béton de chanvre. L'effet positif du viscosant semble plus prononcé pour les formulations possédant un ratio chènevotte/liant élevé puisqu'une relation linéaire entre ces deux paramètres a été observée. De plus, une augmentation de la rigidité du béton de chanvre a pu être constatée puisque le module d'Young a augmenté d'environ 15 % avec les formulations contenant cet adjuvant. Cette augmentation de la rigidité est le reflet d'une amélioration de l'interface liant/végétal.

Pour finir, l'ajout de ce viscosant dans les différentes formulations n'a pas dégradé les bonnes performances thermiques du béton de chanvre. En effet, les valeurs de conductivité thermique du béton de chanvre adjvanté sont très proches de celles du béton de chanvre conventionnel. Ainsi, l'utilisation d'un viscosant comme adjuvant semble être un moyen efficace d'améliorer les performances mécaniques du béton de chanvre, tout en conservant les bonnes qualités thermiques.

Bibliographie

- Amziane S., Arnaud L. (2013). *Bio-aggregate-based building materials – Applications to hemp concretes*, Wiley-ISTE, London.
- Amziane S., Nozahic V., Sonebi M. (2015). Design of mechanically enhanced concrete using hemp shiv, *Proceedings of the 1st International Conference on Bio-Based Building Materials ICBBM 2015*, Clermont-Ferrand, France, p. 422-426.

- Amziane S., Sonebi M. (2015). *Proceedings of the First International Conference on "Bio-based Building Materials" ICBBM 2015*, Proceedings PRO 99, Ed. Amziane S., Sonebi M., Clermont-Ferrand (France), 21-24 Juin 2015, Publications RILEM.
- Amziane S., Sonebi M. (2016). Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters [Online]*, vol. 1, p. 31-38.
- Amziane S., Collet F. (2016a). *Round Robin Test for hemp shiv characterisation: Part 1, evaluation of initial water content and water absorption*. State of The Art Report of 236 TC Bio Based Building Materials, Springer Edition.
- Amziane S., Collet F. (2016b). *Round Robin Test for hemp shiv characterisation: Part 2, bulk density and particle size distribution*. State of The Art Report of 236 TC Bio Based Building Materials, Springer Edition.
- Amziane S., Collet F. (2016c). *Round Robin Test for hemp shiv characterisation: Part3, thermal conductivity*. State of The Art Report of 236 TC Bio Based Building Materials, Springer Edition.
- Bewa H. (2007). *Marché actuel des bioproduits industriels et des biocarburants & évolutions prévisibles à échéance 2015/2030*. Rapport d'étude ADEME, avril 2007.
- Bouloc P. (2006). *Le chanvre industriel - Production et utilisations*, France agricole, Paris.
- Boutin M.-P., Flamin C., Quinton S., Gosse G. (2006). *Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*. Rapport d'étude INRA-ADEME, septembre 2006.
- Cérzo V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Chabannes M., Nozahic V., Amziane S. (2014). Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders. *Materials and Structures*, vol. 48, n° 6, p. 1815-1829.
- Chamoïn J. (2013). *Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation*. Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- Construire en Chanvre (2012). *Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en bétons et mortiers de chanvre*, SEBTP, Paris.
- Evrard A., De Herde A. (2010). Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies. *Journal of Building Physics*, vol. 48, n° 6, p. 1815-1829.
- Igathinathane C., Pordesimo L.O., Columbus E.P., Batchelor W.D., Sokhansanj S. (2009). Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 66, n° 2, p. 147-158.
- Le Troedec M., Sedan D., Peyratout C., Bonnet J.P., Smith A., Guinebretiere R., Gloaguen V., Krausz P. (2008). Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, n° 3, p. 514-522.
- Nguyen T.T. (2010). *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*. Thèse en Génie Civil, Université de Bretagne-sud.

- Nguyen T.T., Picandet V., Amziane S., Baley C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 13, n° 9, p. 1039-1050.
- Nozahic V., Amziane S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, n° 11, p. 1837-1849.
- Nozahic V., Amziane S., Torrent G., Saïdi K., De Baynast H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, n° 2, p. 231-241.
- Patural L., Marchal P., Govin A., Grosseau P., Ruot B., Devès O. (2011). Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 1, p. 46-55.
- Sedan D., Pagnoux C., Chotard T., Smith A., Lejolly D., Gloaguen V., Krausz P. (2007). Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, vol. 42, n° 22, p. 9336-9342.
- Sedan D., Pagnoux C., Smith A., Chotard T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 28, n° 1, p. 183-192.
- Sonebi M., Wana S., Amziane S., Khatib J. (2015). Investigation of the mechanical performance and weathering of hemp concrete, *Proceedings of the 1st International Conference on Bio-Based Building Materials ICBBM 2015*, Clermont-Ferrand, France, p. 416-421.
- Tran Le A.D., Maalouf C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F (2010). Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 10, p. 1797-1806.