

## AMÉLIORATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES BÉTONS BIOSOURCÉS

LAU HIU HOONG Jean David  
ESCADEILLAS Gilles

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Université de Toulouse, UPS, INSA, 135  
avenue de Ranguel 31077 Toulouse Cedex 04

**Résumé :** Les bétons biosourcés sont confectionnés à partir de granulats végétaux, comme la chènevotte issue du chanvre, et de liants souvent à base de chaux naturelle hydraulique et d'additions pouzzolaniques. Ils sont utilisés en tant qu'isolants thermiques possédant de bonnes propriétés hygriques. Cependant leur temps de séchage est très long (plusieurs mois en conditions naturelles) et leur résistance en compression est particulièrement faible (inférieure à 0,5 MPa).

L'objectif de cet article est d'étudier des voies d'amélioration du comportement hygrique et mécanique de ces matériaux en préfabrication soit en traitant la chènevotte avant utilisation, soit en traitant les bétons biosourcés après confection.

Après caractérisation de la chènevotte, des prétraitements avec différents liants ont été effectués (liant commercial destiné au béton de chanvre ou liant à base de chaux hydraulique naturelle et métakaolin flash). Ensuite, plusieurs bétons biosourcés ont été confectionnés par vibrocompaction en faisant varier le type de liant (les mêmes que pour le prétraitement), d'adjuvant (superplastifiant ou agent de viscosité), avant d'être placés dans des atmosphères différentes (65% HR ou 50% CO<sub>2</sub>). Ces bétons ont enfin été caractérisés sur les plans mécanique (résistance en compression) et physique (conductivité thermique, perméabilité à la vapeur d'eau, capacité d'échange hydrique).

Les résultats montrent que les prétraitements permettent de réduire durant les premières heures l'importante absorption d'eau initiale de la chènevotte. Ceci permet ensuite de confectionner des bétons avec moins d'eau et de diminuer les effets de retard de prise liés à la migration des extractibles. Le traitement des bétons après prise par carbonatation accélérée permet d'améliorer sensiblement leur résistance mécanique sans altérer leurs propriétés physiques. Par contre, l'introduction des superplastifiants ou d'agents de viscosité retenus n'améliore pas les performances mécaniques de ce type de béton.

En conclusion, le traitement des bétons biosourcés par carbonatation accélérée permet à la fois d'améliorer le comportement mécanique et l'impact environnemental (quantité de CO<sub>2</sub> piégée plus importante) de ce type de matériau. De plus, il a été montré que la vibrocompression permettait d'obtenir un comportement quasi-isotrope ce qui plaide en faveur de ce procédé de préfabrication.

**Mots-clés :** Béton biosourcé, chènevotte, préfabrication, carbonatation accélérée, résistance mécanique, conductivité thermique

## 1. INTRODUCTION

Le développement des activités industrielles, et notamment celles liées à la construction, se fait souvent au détriment de l'environnement, que ce soit en prélevant et transformant des ressources naturelles non renouvelables ou en produisant des gaz à effet de serre qui conduisent à des changements climatiques importants. Avec l'augmentation continue de la population mondiale et la nécessité de mieux loger les habitants, le secteur de la construction est un des secteurs qui risque de voir son impact augmenter le plus rapidement ces prochaines années. Si on prend le béton, matériau de construction le plus utilisé dans le monde (environ 6 milliards de m<sup>3</sup> mis en œuvre par an), chaque m<sup>3</sup> consomme directement pratiquement 3 tonnes de matériau naturel, 2 MJ d'énergie, 1,2 m<sup>3</sup> d'eau et relargue 250 kg de CO<sub>2</sub>eq. A cette consommation directe du matériau, il faut rajouter la consommation au cours de la vie du bâtiment et notamment celle en énergie nécessaire à maintenir des conditions de vie acceptables en terme de température et hygrométrie.

Pour réduire ces impacts, il est possible de remplacer avantageusement, dans certaines applications non structurales, le béton traditionnel par des bétons biosourcés. Les bétons biosourcés sont confectionnés à partir de granulats végétaux, comme la chènevotte issue du chanvre, qui présentent l'avantage d'absorber durant leur vie le dioxyde de carbone de l'atmosphère par photosynthèse. Ils utilisent aussi souvent des liants à base de chaux naturelle et d'additions pouzzolaniques moins énergivores que le ciment pour leur fabrication et sont susceptibles de fixer du dioxyde de carbone lors de leur carbonatation. Enfin, ce sont de bons isolants thermiques, possédant en plus d'excellentes propriétés hygriques, qui contribuent fortement à la diminution de la consommation d'énergie au cours de la vie du bâtiment.

Cependant leur temps de séchage est très long (plusieurs mois en conditions naturelles ce qui les rend peu facilement utilisables dans la construction moderne) et leur résistance en compression est particulièrement faible (inférieure à 0,5 MPa, ce qui est très insuffisant pour les rendre porteur). L'objectif de cet article est d'étudier des voies d'amélioration des comportements hygrique et mécanique de ces matériaux en préfabrication, tout en maintenant leur bon comportement thermique, soit en traitant la chènevotte avant utilisation, soit en traitant les bétons biosourcés après confection.

## 2. GÉNÉRALITES SUR LE BÉTON DE CHANVRE

La France est le premier producteur européen de chanvre à usage industriel. Ce chanvre peut être valorisé sous différentes formes dans le domaine de la construction et en particulier sous forme de béton. Le béton de chanvre est un mélange de granulats de chanvre, appelés chènevotte, d'une phase minérale liante de composition variable et d'une importante quantité d'eau. Son impact environnemental est faible par rapport aux autres matériaux de construction traditionnels et en particulier il présente un indicateur « effet de serre à 100 ans » négatif de -35,5 kg CO<sub>2</sub> eq. Le béton de chanvre présente d'autres avantages comme de bonnes performances en isolation thermique, en absorption acoustique et comme régulateur d'humidité du fait de la forte porosité intrinsèque de la chènevotte. Il contribue aussi au développement d'une économie circulaire favorisant les acteurs locaux (producteurs, artisans, ...).

Du point de vue réglementaire, le béton de chanvre doit satisfaire en France aux Règles professionnelles d'exécution des ouvrages en chanvre se décomposant en réalisation de mur, isolation de sol, isolation de toiture et application d'enduit.

Au niveau de la mise en œuvre, le béton de chanvre peut être fabriqué sur chantier et mis en place soit manuellement à l'état frais dans un coffrage ou entre deux banches (béton de chanvre banché), soit par projection mécanique par voie sèche directement sur une paroi (béton de chanvre projeté). Il peut aussi être préfabriqué sous forme de blocs vibro-compactés qui sont ensuite assemblés sur chantier classiquement avec un mortier de pose. Les techniques de béton projeté et de béton préfabriqué présentent l'avantage de nécessiter moins d'eau pour la fabrication ce qui réduit d'autant par la suite le temps de séchage du béton qui est un des inconvénients majeurs de ce type de matériau (le séchage peut durer plusieurs mois pour un béton banché dans un bâtiment peu ventilé). La préfabrication permet de s'affranchir de ce problème si les blocs sont livrés après séchage du béton.

L'autre problématique du béton de chanvre vient directement des problèmes de prise et durcissement de certains liants en présence des granulats végétaux et plus particulièrement de leurs phases extractibles en présence d'eau. La figure 1 montre l'évolution du flux de chaleur ou de la chaleur totale dégagée en fonction du temps en calorimétrie isotherme pour deux pâtes, une avec du ciment et de l'eau pure (CIT), l'autre avec le même ciment, de l'eau et de la poudre de chènevotte (CIT+PW). On peut distinguer à la fois l'effet retard des extractibles sur le flux de chaleur et sur la diminution de la chaleur dégagée.

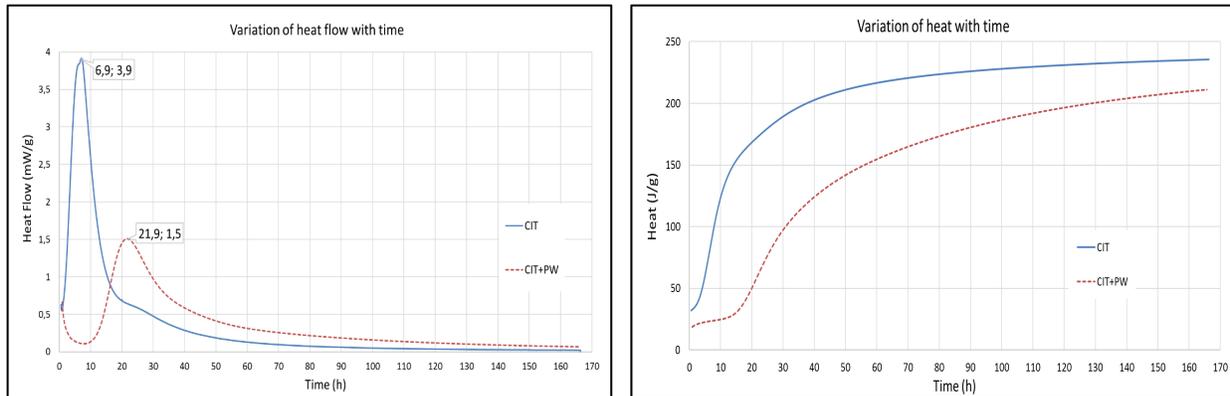


Figure 1 : Suivi du flux de chaleur (à gauche) et de la chaleur dégagée (à droite) de deux ciments gâchés avec de l'eau (CIT) ou avec de l'eau et de la poudre de chènevotte (CIT+PW) (Lau Hiu Hoong, 2016)

Pour limiter cet effet retard et la baisse des performances mécaniques qui en découlent, on peut chercher à modifier la chènevotte en l'enrobant préalablement de matrice cimentaire (Dinh, 2014) ou augmenter la viscosité de la pâte pour limiter la diffusion des extractibles. On peut aussi chercher à compenser le retard en accélérant les processus de montée en résistance mécanique notamment par carbonatation des liants utilisés (Soroushian et al., 2012).

### 3. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

#### 3.1 Matériaux

##### 3.1.1 Liants et adjuvants

Trois liants ont été utilisés :

- un liant commercial très utilisé en France pour ce type d'application (noté CB) ;
- un mélange de chaux hydraulique naturelle 3,5 et de métakaolin flash (noté NK) ;
- un mélange de ciment CEM I 52,5 et de métakaolin flash (noté CK).

Deux adjuvants ont été utilisés :

- un superplastifiant (noté SP) ;
- un agent de viscosité (noté VA).

##### 3.1.2 Chènevotte

Une chènevotte commerciale a été utilisée. Elle est constituée exclusivement de chènevotte calibrée et dépoussiérée (< 1,3% de poussière), issue du défibrage de paille de chanvre, utilisant un procédé de transformation sans eau ni solvant. Sa masse volumique apparente, déterminée selon les recommandations RILEM, est de  $120 \text{ kg/m}^3 \pm 0,45 \text{ kg/m}^3$ . Les particules de chènevotte (gauche) et l'analyse granulométrique résultante (obtenue par analyse d'image selon les travaux de (Picandet, 2013)) sont montrées Figure 2. On constate que les particules sont comprises entre 2 et 20 mm (diamètre moyen de 8 mm) et qu'elles sont particulièrement allongées.

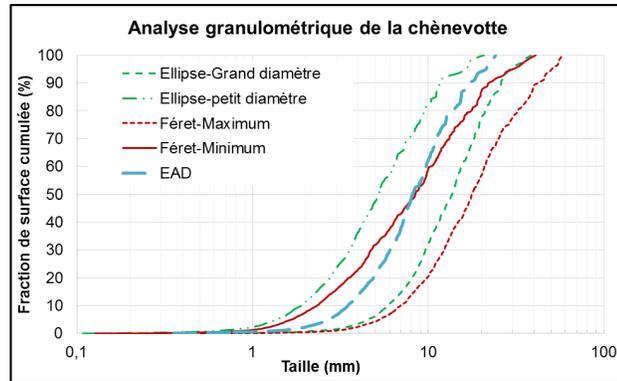


Figure 2 : Aspect de la chènevotte (à gauche) et analyse granulométrique par analyse d'images (à droite)

### 3.2 Fabrication des échantillons et essais réalisés

#### 3.2.1 Réalisation des échantillons

La réalisation des échantillons à tester comporte 3 étapes : le prétraitement de la chènevotte s'il y a lieu, la fabrication du béton et des éprouvettes et la cure des éprouvettes.

Le prétraitement de la chènevotte a été fait dans un malaxeur de 10 litres selon la procédure suivante :

- introduire la chènevotte (1, soit la totalité de la chènevotte) ;
- introduire une partie de l'eau (1/6) et malaxer à petite vitesse durant 3 minutes ;
- introduire le liant (1/3) et malaxer à petite vitesse 1 minute ;
- introduire l'eau restante (1/6), et les adjuvants (1/3) s'il y a lieu, et malaxer à petite vitesse 5 minutes ;
- laisser le mélange 72h à l'air libre (i) ou 24h en enceinte de carbonatation accélérée (20°C, 65% HR, 50% CO<sub>2</sub>) (ii) avant malaxage final.

Le malaxage final a été fait dans un malaxeur de 10 litres selon la procédure suivante :

- introduire la chènevotte prétraitée ou non ;
- introduire la moitié de l'eau prévue (2/6) et malaxer à petite vitesse 3 minutes ;
- introduire le liant prévu (2/3) et malaxer à petite vitesse 1 minute ;
- introduire l'eau restante (2/6), et les adjuvants s'il y a lieu (2/3), et malaxer à petite vitesse 5 minutes.

La mise en œuvre des échantillons (3 par formulation et par essai) a été fait par vibrocompaction dans des moules cubiques selon la procédure suivante :

- remplir le moule de la quantité de béton de chanvre calculée selon la densité visée ;
- mettre le piston puis compacter sous 0,6 MPa en vibrant 2 fois 15 secondes ;
- maintenir la charge sans vibration 1 minute ;
- démouler immédiatement l'échantillon compacté et le placer dans les conditions de cure prédéfinies.

Les conditions de cure ont été :

- soit 3 jours en sac étanche à 20°C + 25 jours en salle à atmosphère contrôlée (20°C, 65% HR) ;
- soit 7 jours en enceinte de carbonatation (20°C, 65% HR, 50% CO<sub>2</sub>) + 21 jours en salle à atmosphère contrôlée (20°C, 65% HR), notée CO<sub>2</sub>.

#### 3.2.2 Essais réalisés

Trois types d'essais ont été réalisés à 28 jours :

- des essais mécaniques à vitesse de charge imposée (précharge de 5N, montée en charge de 0,15 kN/s, capteur de 50 kN). Cet essai a pour objectif de déterminer la résistance mécanique en compression du béton de chanvre ;
- des essais de conductivité thermique avec un appareil à fil chaud (temps de mesure de 60 s, échantillonnage de 1s et puissance de 0,15W). Cet essai, pratiqué entre deux cubes de même

composition et selon deux directions principales (parallèle ou perpendiculaire à la direction de compression), a pour objectif de déterminer la conductivité thermique du matériau en équilibre avec son environnement (20°C, 65% HR) ;

- des essais MBV (Moisture Buffer value) effectués selon le protocole NORDEST (Rode et al., 2005) avec des cycles de 8 heures à 75% HR et 16 heures à 33% HR. Cet essai permet d'évaluer la capacité du matériau à réguler l'humidité ambiante dans une pièce.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Effet du prétraitement de la chènevotte sur sa capacité d'absorption d'eau

La figure 3 montre l'évolution de la capacité d'absorption d'eau de la chènevotte en fonction de la racine carrée du temps selon le prétraitement effectué (essai selon la procédure RILEM (Amziane et al., 2017)).

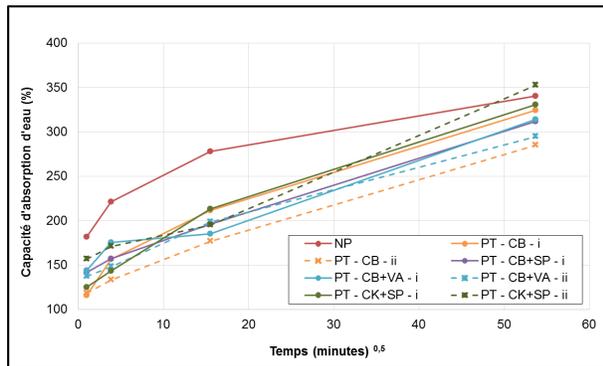


Figure 3 : Evolution de la capacité d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps

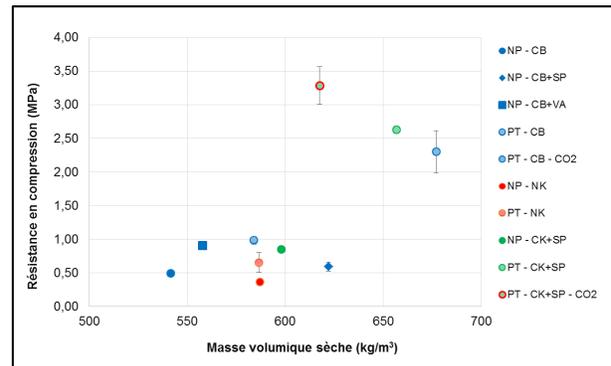


Figure 4 : Variation des résistances en compression en fonction de la masse volumique

On peut voir que les différents prétraitements modifient de manière significative la cinétique d'absorption d'eau de la chènevotte. Alors que la chènevotte non prétraitée (NP) présente durant les premières heures une capacité d'absorption d'eau très rapide avant de ralentir, les chènevottes prétraitées (PT) montrent une capacité d'absorption d'eau qui évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps, caractéristique d'un phénomène diffusif. A 15 min ou à 4 h, la capacité d'absorption d'eau de la chènevotte est pratiquement divisée par 2 avec les prétraitements, cet effet disparaissant à 48 h. Par contre, on ne voit pas d'effet significatif entre les prétraitements que ce soit vis-à-vis du type de liant et d'adjuvant (CB, CB+SP, CB+VA, CK+SP), ou bien de la cure après traitement (i / ii).

Ce résultat général montre bien l'intérêt du prétraitement qui, en formant une sorte de coque de liant autour de chaque particule de chènevotte, transforme l'absorption classique de l'eau dans la particule en une diffusion de l'eau au travers de la couche de liant hydratée.

### 4.2 Effet des traitements sur les résistances mécaniques

La figure 4 présente les variations de résistance en compression mesurées sur cube pour les différents bétons testés.

D'une manière générale, on peut voir deux grandes familles de béton :

- tous les bétons avec chènevotte non prétraitée et ceux avec chènevotte prétraitée avec liants CB ou NK, qui présentent un niveau de résistance compris entre 0,4 et 1 MPa pour des masses volumiques sèches comprises entre 540 et 630 kg/m<sup>3</sup> ;
- les bétons traités au CO<sub>2</sub> après la mise en œuvre ainsi que le béton avec chènevotte prétraitée et le liant CK+SP qui présentent des résistances supérieures à 2 MPa pour des masses volumiques sèches comprises entre 620 et 680 kg/m<sup>3</sup>.

Si on regarde plus précisément l'influence des différents paramètres étudiés :

- l'incorporation d'agent de viscosité avec une chènevotte non prétraitée (mélange NP - CB+VA comparé au mélange NP - CB) permet d'améliorer la résistance mécanique de 0,5 à 0,9 MPa) même si celle-ci reste basse. Cette augmentation peut s'expliquer par une limitation de la diffusion des extractibles de la chènevotte vers la pâte diminuant de fait les problèmes de prise et durcissement ;
- l'introduction de superplastifiant réducteur d'eau avec une chènevotte non prétraitée (mélanges NP - CB et NP - CB+SP) ne conduit pas à une augmentation significative de la résistance mécanique (respectivement 0,5 MPa et 0,6 MPa) bien que la masse volumique sèche augmente. Ceci peut être lié au fait que la réduction d'eau n'est pas suffisante pour limiter la diffusion d'extractible. Il est aussi à noter la difficulté à réduire l'eau pour les mélanges contenant de la chaux hydraulique ;
- le prétraitement de la chènevotte se traduit par des augmentations de résistance mécanique : de 0,5 à 1 MPa pour le mélange avec liant CB, de 0,4 à 0,7 pour le mélange avec liant NK et de 0,9 à 2,6 MPa pour le mélange avec liant CK+SP. Le prétraitement s'avère donc essentiel dans le cas d'utilisation de ciment (CK). Ceci est à mettre en relation avec les effets particulièrement négatifs des extractibles sur la prise et le durcissement des ciments Portland. L'enveloppe créée autour des particules de chènevotte permet donc de limiter ces effets ;
- le traitement au CO<sub>2</sub> des bétons après mise en œuvre (mélanges PT - CB - CO<sub>2</sub> et PT - CK+SP - CO<sub>2</sub>) conduit à une augmentation sensible des résistances (respectivement 2,3 et 3,3 MPa) avec une variation de la masse volumique sèche (plus élevée pour le premier mélange avec chaux hydraulique majoritaire et plus faible pour le mélange avec ciment portland majoritaire). La carbonatation rapide de la portlandite et potentiellement des C-S-H conduisant à de la calcite plus rigide peut expliquer cette augmentation de résistance. Elle peut aussi s'expliquer par une diminution de la diffusion des extractibles de la chènevotte vers la pâte liée à la structuration plus rapide de cette pâte.

Ainsi, que ce soit le prétraitement de la chènevotte avec une partie de la phase liante utilisée pour fabriquer le béton de chanvre ou le traitement au CO<sub>2</sub> du béton qui vient d'être mis en œuvre, ces deux techniques permettent d'augmenter notablement la résistance mécanique des bétons de chanvre.

### 4.3 Effet des traitements sur les conductivités thermiques

La figure 5 présente les variations de conductivité thermique mesurées sur cube perpendiculairement à la direction de compression pour les différents bétons testés (à noter que les valeurs mesurées parallèlement à la direction de compression sont équivalentes traduisant un comportement isotrope du matériau).

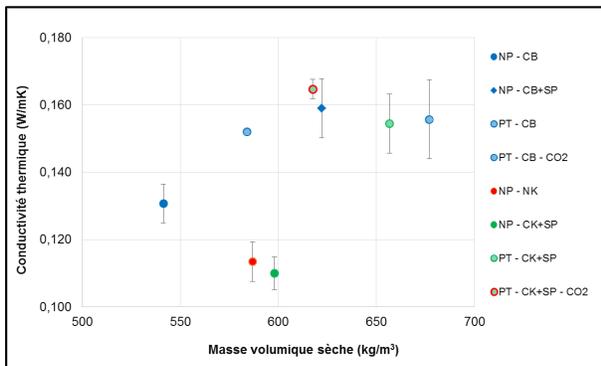


Figure 5 : Variation des conductivités thermiques en fonction de la masse volumique sèche

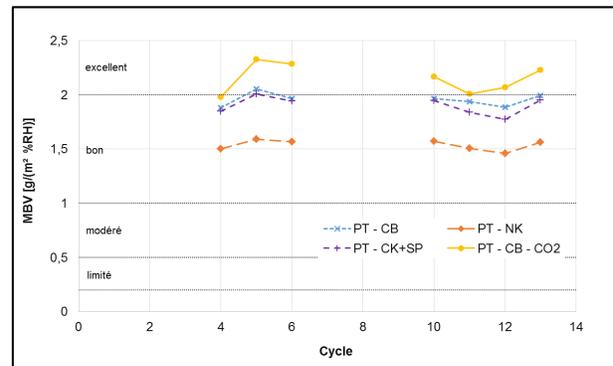


Figure 6 : Evolution du MBV en fonction du nombre de cycle humidité-séchage

D'une manière générale on a trois niveaux de conductivité thermique :

- les bétons avec liants NK et CK+SP, sans prétraitement de la chènevotte, présentent les conductivités les plus faibles (0,11 W/m.K) ;
- le béton avec liant CB, sans prétraitement, a une valeur intermédiaire (0,13 W/m.K) ;

- les bétons avec chènevotte prétraitée ont des conductivités plus élevées (0,15 à 0,16 W/m.K), tout comme le béton CB + SP, sans prétraitement de la chènevotte, qui fait figure d'exception.

Le prétraitement de la chènevotte conduit donc à une augmentation de la conductivité thermique, indépendamment du liant utilisé.

### 4.3 Effet des traitements sur la régulation hydrique

La figure 6 présente l'évolution du MBV en fonction du nombre de cycles pour quatre bétons testés. Cette figure montre que le MBV varie peu en fonction du nombre de cycles ce qui traduit une rapidité de mise en équilibre hydrique de ce type de matériau. On voit aussi que les bétons testés ont des MBV qualifiés de bon (PT – NK, PT – CK+SP, PT - CB) à excellent (PT – CB – CO<sub>2</sub>).

Les matériaux testés présentent de très bonnes capacités à réguler l'humidité dans les bâtiments ce qui contribue au confort hygrothermique et à la santé de l'utilisateur (en limitant la possibilité de développement fongique) tout en lui permettant de faire des économies d'énergie.

### 4.4 Comparaison avec les données de la littérature

#### 4.4.1 Résistances mécaniques

Les résistances en compression de bétons de chanvre données dans la littérature ainsi que celles obtenues dans cette étude sont présentées figure 7 en fonction de leur masse volumique sèche. Trois niveaux de résistance sont aussi indiqués : 1 MPa, correspondant à la valeur limite maximale souvent indiquée pour les bétons de chanvre, 3 MPa, correspondant à la valeur limite minimale pour les bétons autoclavés et 4 MPa, correspondant à la valeur limite minimale pour les blocs de bétons préfabriqués.

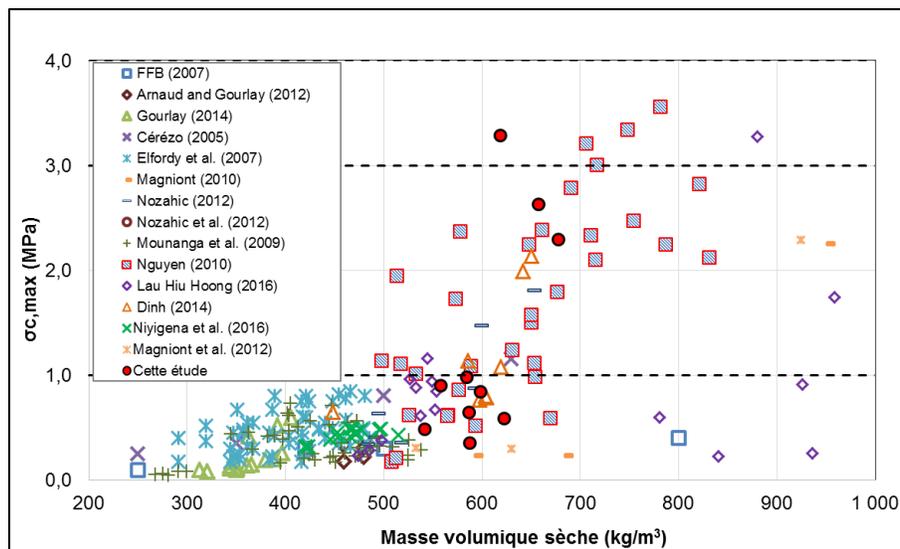


Figure 7 : Variation des résistances en compression en fonction de la masse volumique sèche de bétons issus de la littérature ou testés dans cette étude

On peut voir que la résistance des bétons de chanvre augmente avec la masse volumique sèche et que la majorité des résultats, y compris ceux de notre étude, se situe en dessous de 1 MPa. Quelques résultats sont toutefois au-dessus de cette limite : des résultats de Cerezo (Cerezo, 2005) correspondant à des bétons testés à 2 ans, de Dinh (Dinh, 2014) correspondant à l'utilisation de granulats de chènevotte prétraités, de Nguyen (Nguyen, 2010) et de Nozahic (Nozahic, 2012) pour des bétons maintenus 2 jours sous compression après mise en œuvre, de Lau (Lau, 2016) pour des bétons confectionnés avec un liant

dérivé d'une formulation de béton traditionnel à ultra haute performance, et de cette étude pour des bétons traités après mise en œuvre par le CO<sub>2</sub>. De tous ces résultats supérieurs à 1 MPa, ceux obtenus par prétraitement de la chènevotte avant utilisation, ou traitement au CO<sub>2</sub> après mise en œuvre, s'avèrent les moins contraignants pour une mise en œuvre industrielle en préfabrication.

#### 4.4.2 Conductivité thermique

Les conductivités thermiques de bétons de chanvre données dans la littérature ainsi que celles obtenues dans cette étude sont présentées dans la figure 8 en fonction de leur masse volumique sèche.

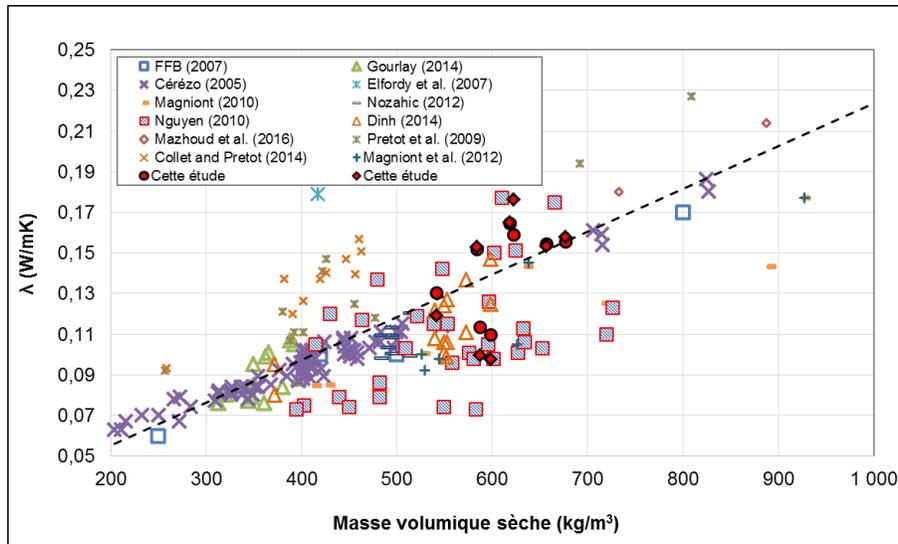


Figure 8 : Variation des conductivités thermiques en fonction de la masse volumique sèche pour des bétons de la littérature ou testés dans cette étude

Cette figure montre que la conductivité thermique augmente avec la masse volumique sèche du matériau de manière quasi linéaire (schématisée par la ligne pointillée). La plupart des bétons caractérisés dans la littérature ont une conductivité qui varie de 0,06 à 0,15 W/m.K lorsque leur masse volumique varie de 200 à 600 kg/m<sup>3</sup>.

Nos résultats s'inscrivent dans la tendance générale ce qui signifie que les prétraitements de la chènevotte ou le traitement au CO<sub>2</sub> du béton après mise en œuvre ne modifient pas fondamentalement la conductivité thermique du matériau.

#### 4.4.3 Régulation hydrique

La figure 9 montre les MBV de plusieurs matériaux issus de la littérature ou obtenus dans cette étude.

Cette figure met en évidence le bon à excellent comportement des matériaux biosourcés en termes de régulation hydrique par rapport aux matériaux plus traditionnels comme le béton, la brique et même le bois. Les matériaux de cette étude présentent un comportement similaire à ceux décrits dans la littérature avec notamment un des meilleurs résultats obtenu avec le béton de chanvre traité au CO<sub>2</sub> après sa mise en œuvre.

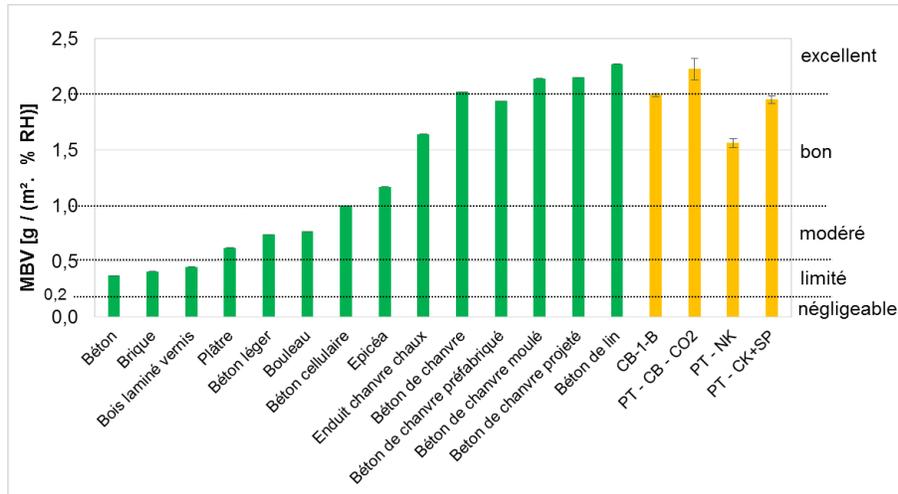


Figure 9 : MBV de matériaux issus de la littérature ou obtenus dans cette étude (Collet et al., 2012 ; Lelievre et al., 2014 ; Mazhoud et al., 2016 ; Rahim et al., 2015 ; Rode et al., 2005)

## 5. CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif de tester des solutions facilement applicables en préfabrication permettant d'améliorer les performances mécaniques des bétons de chanvre sans altérer leurs performances thermiques et hydriques.

La première étape a consisté à étudier l'effet d'un prétraitement de la chènevotte par une partie de la phase liante. Les résultats obtenus montrent que ce prétraitement permet de diminuer fortement la capacité d'absorption d'eau de la chènevotte, notamment sur les premières heures, en transformant l'absorption classique de l'eau dans la particule en une diffusion de l'eau au travers de la couche de liant hydraté (absorption linéaire en fonction de la racine carrée du temps conformément à la 2<sup>nd</sup>e loi de Fick). Ils montrent aussi que les résistances mécaniques à 28 jours sont améliorées, ce qui peut être attribué à la limitation de la diffusion des ions extractibles de la chènevotte responsables des retards de prise et de durcissement, sans altérer les propriétés thermiques et hydriques. Cependant, cette augmentation des résistances mécaniques reste faible à l'exception du béton à base de liant Portland réputé plus sensible aux extractibles organiques.

La deuxième étape a consisté à étudier l'effet d'un traitement au CO<sub>2</sub> du béton de chanvre juste après sa mise en œuvre. Ce traitement conduit à une augmentation sensible des résistances mécaniques, avec maintien des performances hydriques et légère altération des performances thermiques. Cette amélioration peut être reliée à la carbonatation rapide de la portlandite et potentiellement des C-S-H conduisant à la formation de calcite plus rigide.

Au final, l'effet conjugué du prétraitement de la chènevotte avec une partie du liant utilisé et du traitement du béton avec du CO<sub>2</sub> après sa mise en œuvre, traitements faciles à mettre en œuvre en préfabrication, permet d'obtenir des performances mécaniques, thermiques et hydriques particulièrement intéressantes.

Pour compléter cette étude, il conviendrait d'évaluer la durabilité des solutions proposées ainsi que leur impact environnemental. Pratiquement, la recherche de réducteurs d'eau spécifiques à la chaux hydraulique pourrait aussi contribuer à améliorer le comportement de certains bétons de chanvre.

## Remerciements

Les auteurs remercient le Tremplin Carnot MECD pour le soutien financier de cette étude.

## RÉFÉRENCES

- Amziane S., Collet F., Lawrence M., Magniont C., Picandet V. et Sonebi M. (2017), Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity, *Materials and Structures*, 6: 50:167.
- Arnaud L. et Gourlay E. (2012), Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Construction and Building Materials*, 28: 50–56.
- Cérézo V. (2005), Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique, *Thèse Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*.
- Collet F. et Pretot S. (2012), Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, *Construction and Building Materials*, 36: 58–65.
- Collet F. et Pretot S. (2014), Thermal conductivity of hemp concretes: variation with formulation, density and water content, *Construction and Building Materials*, 65: 612–19.
- Dinh T.M. (2014), Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant, *Thèse Université Toulouse III*.
- Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y. et Goudet L. (2007), Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials*, 22: 2116–23.
- Fédération Française du Bâtiment (2007), Construire en chanvre : Règles professionnelles d'exécution, *Collection Recherche, Développement, Métier*, SEBTP.
- Gourlay E. (2014), Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre : détermination de l'impact des matières premières et de la méthode de mise en œuvre, *Thèse Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*.
- Lau Hiu Hoong J.D. (2016), Contribution to the improvement of the mechanical strength of binders for hempcrete, *Internal Internship Report, LMDC, Université Toulouse III*, 73 pages.
- Lelievre D., Colinart T. et Glouannec P. (2014), Hygrothermal behavior of bio-Based building materials including hysteresis effects: experimental and numerical analyses, *Energy and Buildings*, 84: 617–27.
- Magniont C. (2010), Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, *Thèse Université Toulouse III*.
- Magniont C., Escadeillas G., Coutand M. et Oms-Multon C. (2012), Use of plant aggregates in building ecomaterials, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16: 17–33.
- Mazhoud B., Collet F., Pretot S. et Chamoin J. (2016), Hygric and thermal properties of hemp-Lime plasters, *Building and Environment*, 96: 206–16.
- 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 Université de Bretagne Sud*.
- Niyigena C., Amziane S., Chateauneuf A., Arnaud L., et al. (2016), Variability of the Mechanical Properties of Hemp Concrete, *Materials Today Communications*, 7: 122–33.
- Nozahic V., Amziane S., Torrent G., Saïdi K. et De Baynast H. (2012), Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder, *Cement and Concrete Composites*, 34: 231–41.
- Nozahic V. (2012), Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux, *Thèse Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- Picandet V. (2013), Chap 2 : Caractérisation des granulats d'origine végétale, *Les bétons de granulats d'origine végétale : Application au béton de chanvre*, Amziane S., Arnaud L., Ed. Lavoisier, 352 p.
- Pretot S., Collet F., Glouannec P. et Lang V. (2009), Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation, *Congrès Français de Thermique*, Vannes 2: 865–870.
- Rahim M., Douzane O., Tran Le A.D., Promis G., Laidoudi B., Crigny A., Dupré B. et Langlet T. (2015), Characterization of flax lime and hemp lime concretes: hygric properties and moisture buffer capacity, *Energy and Buildings*, 88: 91–99.
- Rode C., Peuhkuri R., Time B., Svennberg K., Ojanen T., Mukhopadhyaya P. Kumaran M., et Dean S. W. (2005), Moisture Buffer Value of Building Materials, ISSN 1601 – 2917, ISBN 87-7877-195-1.
- Soroushian P., Won J.P. et Hassan M. (2012), Durability Characteristics of CO<sub>2</sub>-Cured Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 34: 44–53.