

---

# Etude de la durabilité d'isolants à base de granulats végétaux - Méthodologie

**Guillaume Delannoy<sup>1</sup>, Sandrine Marceau<sup>1</sup>, Marielle Guéguen-Minerbe<sup>1</sup>, Philippe Glé<sup>2</sup>, Etienne Gourlay<sup>2</sup>, Sofiane Amziane<sup>3</sup>, Fabienne Farcas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université Paris Est, IFSTTAR, MAST/CPDM, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

mail : guillaume.delannoy@ifsttar.fr, sandrine.marceau@ifsttar.fr, marielle.gueguen@ifsttar.fr, fabienne.farcas@ifsttar.fr

<sup>2</sup> CEREMA Est, Laboratoire de Strasbourg, 67035 Strasbourg Cedex 2

mail : philippe.gle@cerema.fr, etienne.gourlay@ifsttar.fr

<sup>3</sup> Institut Pascal, Polytech' Clermont-Ferrand, Université de Clermont-Ferrand, 63174 Aubière

mail : sofiane.amziane@polytech.univ-bpclermont.fr

---

*RÉSUMÉ. Pour estimer la durabilité du béton de chanvre, il est nécessaire de comprendre les mécanismes qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés du matériau. Dans cet article nous présentons une méthodologie d'analyse fondée sur une étude bibliographique, dont l'objectif est de déterminer les facteurs susceptibles d'entraîner des modifications de propriétés du béton de chanvre. Les variations d'humidité relative, le développement de microorganismes et l'alcalinité du liant sont les principaux facteurs qui ont été identifiés. Deux formulations de type « Mur » ont été sélectionnées à partir de deux liants : un liant formulé à base de chaux et un ciment prompt naturel. Après une période de durcissement de 90 jours qui permet l'hydratation du liant, les éprouvettes seront soumises à différents types de vieillissements : un vieillissement environnemental, un vieillissement microbiologique et un vieillissement naturel. La caractérisation de l'évolution des propriétés du matériau avec une approche multiéchelle et pluridisciplinaire permettra de comprendre les mécanismes de dégradation et d'estimer la durée de vie de ces matériaux.*

*ABSTRACT. The study of hemp concrete durability needs to understand the mechanisms involved in the modifications of the material properties. The methodology of this work is presented in this article. A bibliographic research allowed us to determine the parameters inducing evolutions of the material characteristics. Variations of relative humidity, the microorganism's growth and the alkalinity of the binder are the main parameters identified by this research. Two "wall" formulations are manufactured with two different binders, a formulated binder with limes, and a prompt natural cement. 90 days of curing allow the hydration of the binder. Those samples will be placed in different accelerated aging conditions: an environmental aging, a biological aging and a natural aging. The characterization of the material properties' modifications will be done using a multiscale and pluridisciplinarity approach. From the analysis of the material properties' evolution during these different agings, the understanding of the degradation mechanisms will be possible, followed by an estimation of the lifetime of the hemp concrete.*

*MOTS-CLÉS : béton de chanvre, durabilité, vieillissement, propriétés, méthodologie*

*KEY WORDS: hemp concrete, durability, aging, properties, methodology*

---

## 1. Introduction

Produisant 22% des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'air en France et utilisant 44% de la consommation totale d'énergie, le secteur du bâtiment se doit d'améliorer ses performances énergétiques et environnementales. La rénovation énergétique est un moyen efficace de réduire la consommation en énergie d'un bâtiment en améliorant son isolation thermique. Enfin l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement et renouvelables permet aussi de réduire les émissions de dioxyde de carbone. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'utilisation de matériaux isolants à base de granulats végétaux comme le chanvre.

Les bétons de chanvre sont des matériaux composés d'un granulats végétal, la chènevotte, issue de la tige de la plante, et d'un liant minéral. Ils sont utilisés depuis 30 ans pour leurs propriétés fonctionnelles : isolation thermique ( $\lambda_{\text{sec}} \approx 0,10 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), acoustique [GLE13] et leur comportement hygrothermique [GOU14]. Ces propriétés sont issues de la porosité importante du matériau (porosité totale : 75% - porosité ouverte 70%) [COL08]. La caractérisation de ces propriétés fonctionnelles fait l'objet d'un grand nombre de travaux, mais très peu de recherches portent sur l'évaluation de leur durabilité, pourtant nécessaire à leur développement industriel.

Face à ce manque de données, l'objectif général de notre étude est d'estimer la durabilité des bétons de chanvre à l'aide de différents types de vieillissements. Dans cet article nous présentons la méthodologie de l'étude que nous avons adoptée. Elle est basée sur une étude bibliographique qui nous a permis de sélectionner les matériaux de l'étude et les protocoles de vieillissement pertinents à appliquer. Une caractérisation des propriétés des bétons de chanvre sera ensuite réalisée à différentes échéances des vieillissements. L'analyse des résultats permettra, à l'aide d'une approche multiéchelle et pluridisciplinaire, une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine de l'évolution des propriétés du matériau au cours du temps. Une première estimation de la durée de vie sera alors possible.

## 2. Durabilité des composites végétaux-liants minéraux : état de l'art

Dans un bâtiment, le béton de chanvre est soumis à des variations d'humidité relative et de température (intérieur et extérieur de l'habitat). On parle de contraintes environnementales. Afin d'étudier les mécanismes d'évolution des propriétés du matériau, plusieurs études ont tenté de simuler en laboratoire les variations environnementales d'un habitat à l'aide de différents protocoles. Les résultats de ces travaux ont permis d'identifier les facteurs à l'origine de modifications des propriétés du béton de chanvre et de mettre en place des protocoles de vieillissements accélérés cohérents avec les conditions réelles auxquelles est soumis le matériau intégré à un bâtiment.

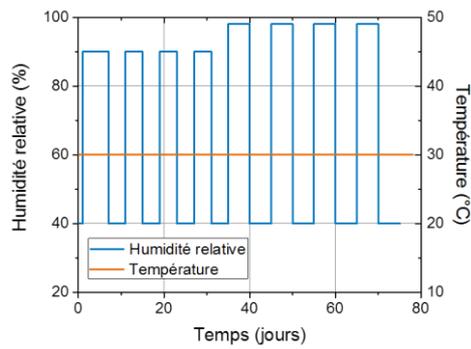
### 2.1. Durabilité des bétons de chanvre

Peu d'études portent sur la durabilité des bétons de chanvre. Celles existantes consistent à soumettre les matériaux à des variations d'humidité relative et à caractériser les modifications de leurs propriétés après vieillissement. Ces travaux portent également sur le développement fongique potentiel à la surface des matériaux.

#### 2.1.1. Conditions environnementales

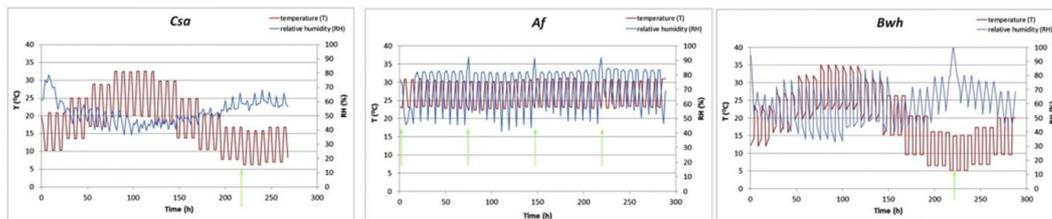
Les variations d'humidité relative peuvent être importantes sur une période courte à l'intérieur comme à l'extérieur d'un bâtiment (différence jour/nuit, période pluvieuse, utilisation par les occupants etc.). Ces variations cycliques peuvent représenter des sources de modifications des propriétés des matériaux. De plus du fait de son hydrophilie importante, le béton de chanvre peut absorber plus de 20% de sa masse en eau lorsqu'il est soumis à une atmosphère saturée en vapeur d'eau [COL13]. Dans le cadre de plusieurs travaux, des bétons de chanvre ont donc été soumis en laboratoire à des variations d'humidité relative afin de reproduire ce phénomène.

Des cycles d'humidification-séchage (40 à 90% HR puis 40 à 98% HR) à température constante (30°C) (Figure 1) ont été réalisés par Marceau *et al.* [MAR15] pendant 75 jours. Les éprouvettes ont préalablement été conservées 90 jours à 50% HR et à 20°C afin d'assurer l'hydratation du liant. A l'issue du vieillissement, une légère diminution de la porosité accessible à l'air est observée. Ce résultat pourrait être lié à la poursuite des réactions d'hydratation et de carbonatation du liant, favorisées par une teneur en eau plus élevée que durant la période de séchage. Après ces cycles, aucune variation des propriétés thermiques et acoustiques n'a pu être mise en évidence, malgré la variation de porosité. Celle-ci n'est peut-être pas assez significative pour modifier également les propriétés fonctionnelles du matériau. Des temps de vieillissement plus longs pourraient peut-être permettre d'observer des modifications visibles.



**Figure 1** : Cycles d'humidification/séchage en chambre climatique de béton de chanvre. [MAR15]

La même conclusion est obtenue dans une autre étude [ARI16] où différents climats sont simulés en chambres climatiques (climat tropical, méditerranéen et semi-aride) après 3 mois de séchage à 65% HR et 20°C. Le vieillissement accéléré représentant les 12 mois d'une année est mené pendant 12 jours (les valeurs de température et d'humidité relative moyennes de chaque mois de l'année sont imposées pendant une journée de vieillissement accéléré). Des périodes de pluie sont simulées par arrosage des éprouvettes de bétons de chanvre (Figure 2).

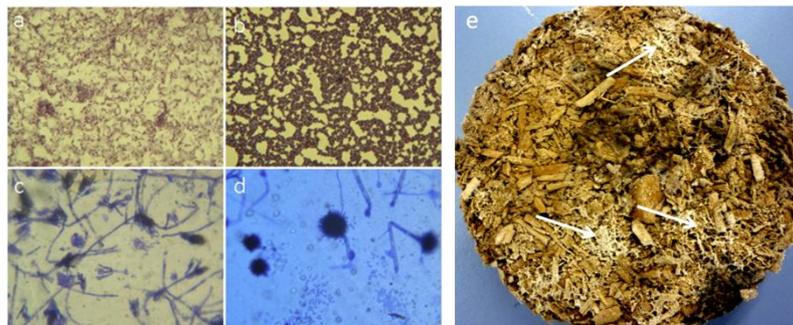


**Figure 2** : Température et humidité relative relevées dans les chambres climatiques selon différents climats (Csa : méditerranéen ; Af : tropical ; Bwh : semi-aride). Les flèches vertes représentent un arrosage des éprouvettes simulant un épisode pluvieux. [ARI16]

Après les différents cycles de vieillissement, peu de variations macroscopiques sont observées (faible gonflement après arrosage, léger changement de couleurs). En revanche, l'hydratation et la carbonatation des liants sont différentes en fonction des climats simulés et des éprouvettes de référence. Les éprouvettes soumises au climat tropical sont notamment plus carbonatées. Dans cette étude il est cependant difficile de différencier l'impact de la température, des variations d'humidité relative et de l'absorption d'eau après arrosage.

### 2.1.2. Développement de microorganismes

Dans les deux études présentées précédemment [MAR15, ARI16] les auteurs ont mis en évidence le développement de microorganismes, champignons et bactéries (Figure 3), sur les éprouvettes de béton de chanvre. Ces microorganismes sont initialement présents sur la plante de chanvre.



**Figure 3** : Développement de microorganismes sur les bétons de chanvre (a : Gram-positive bacilli ; b : Gram-positive cocci ; c : Penicillium ; d : Aspergillus [ARI16] ; e : moisissures sur éprouvette de béton de chanvre [MAR15]).

Marceau et al. [MAR15] ont mis en évidence une influence du pH sur le développement des microorganismes. Des échantillons de béton de chanvre sont inoculés par vaporisation d'une suspension contenant trois souches bactériennes 14 jours et 120 jours après leur fabrication, puis conservés pendant trois mois à 30°C et 98% HR. Après ces trois mois, le pH de surface du matériau inoculé à 14 jours est de 10,5, aucun développement de microorganismes n'est observé. Sur celui inoculé à 120 jours, le pH de surface du béton est de 8,7. A ce pH les auteurs observent un développement de microorganismes. La portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) présente dans le liant a réagi avec le  $\text{CO}_2$  de l'air pour former des carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Cette réaction de carbonatation est à l'origine de la diminution du pH de surface du matériau qui paraît favorable au développement de microorganismes.

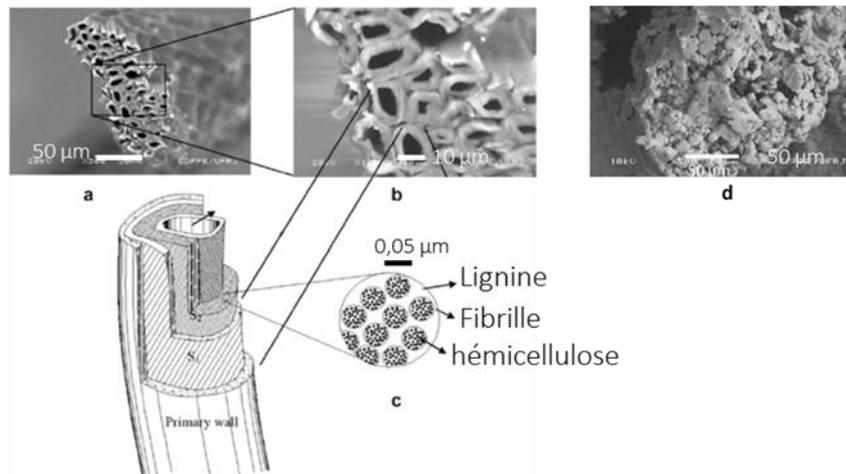
Grâce à des analyses par diffraction des rayons X, Arizzi *et al.* [ARI16] observent une quantité importante de vaterite, forme moins stable du carbonate de calcium. Cela est expliqué par la présence de microorganismes qui sont capables de favoriser la formation du carbonate de calcium sous cette forme. Les microorganismes ont donc également un impact sur les propriétés chimiques du matériau.

## 2.2. Durabilité de composites fibres-liants minéraux

Un certain nombre de travaux ont porté sur la durabilité de composites cimentaires renforcés mécaniquement par des fibres végétales. De nombreux protocoles de vieillissement sont utilisés pour ces études, notamment l'immersion dans l'eau ou dans une solution alcaline. Dans ces travaux, la diminution des propriétés mécaniques après vieillissement est expliquée par la dégradation du végétal au contact de la matrice cimentaire. Deux mécanismes de dégradation du végétal ont été proposés : la minéralisation des fibres et la dégradation alcaline de la paroi végétale, détaillées dans les chapitres suivants.

### 2.2.1. Minéralisation des fibres

La portlandite présente dans le ciment hydraté est soluble dans la solution interstitielle, c'est-à-dire la solution située dans les pores du matériau. Par diffusion, les ions calcium et hydroxyde migrent dans les pores des fibres élémentaires du végétal, appelées *lumen* (Figure 4 a, b, c). Lorsque la teneur en eau diminue, la portlandite précipite autour des fibres et au sein de la *lumen* (Figure 4 d). Cette minéralisation fragilise les fibres, ce qui diminue les propriétés mécaniques en flexion et en traction du matériau composite. La porosité des fibres diminue aussi du fait de cette précipitation.



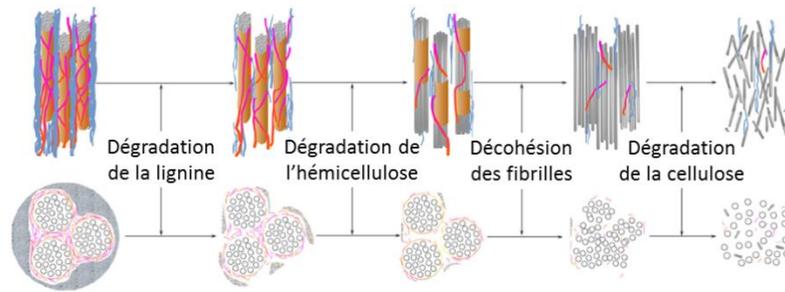
**Figure 4** : Structure d'une fibre et minéralisation. **a, b** : coupe transversale d'une fibre de sisal ; **c** : schéma de la structure de la paroi cellulaire ; **d** : minéralisation d'une fibre de sisal [TOL09]

Dans le cas du béton de chanvre, les propriétés thermiques et acoustiques du matériau sont dues à la porosité importante du granulat. La minéralisation de la chènevotte pourrait donc être à l'origine d'une modification des propriétés thermiques et acoustiques du matériau.

### 2.2.2. Dégradation alcaline du végétal en milieu alcalin

L'attaque alcaline représente une source de dégradation du végétal. Dans un premier temps, Wei *et al.* [WEI15] décrivent une attaque alcaline de la lignine, qui sert de « colle » entre les microfibrilles de cellulose qui composent majoritairement la paroi cellulaire (Figure 5). Dans un second temps, l'hémicellulose qui entoure les chaînes de cellulose pour former la microfibrille est attaquée, laissant la cellulose apparente.

Pejic *et al.* [PEJ08] observent que l'extraction de la lignine et de l'hémicellulose de fibres de chanvre entraîne une diminution de la capacité d'absorption de vapeur d'eau. Enfin, la dégradation alcaline des chaînes de cellulose entraîne une décohésion de la matière végétale (Figure 5).



**Figure 5 :** Schéma des mécanismes de dégradation de fibres végétales en milieu cimentaire [WEI15]

### 2.3. Conclusion

A partir de cette analyse bibliographique, les différents paramètres identifiés pouvant entraîner des modifications des propriétés fonctionnelles ou des propriétés microscopiques sont : les variations d'humidité relative, le développement de microorganismes et la nature alcaline du liant minéral.

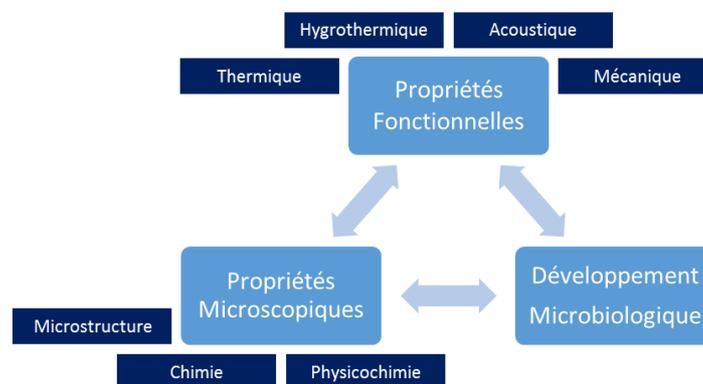
### 3. Méthodologie

L'identification des facteurs clés de la dégradation nous a permis de mettre en place une méthodologie pour l'étude de la durabilité des bétons de chanvre.

La première étape est la sélection des matériaux. Cette étape consiste à choisir les couples liant/granat, ainsi que les paramètres de formulation (rapport massique liant/granat, rapport massique eau/liant). Selon les règles professionnelles d'exécution de Construire en Chanvre [CeC12], le béton de chanvre peut être utilisé pour isoler des toitures, des murs ou des sols, avec de rapport massique liant/granat pouvant varier de 1 à 8.

La deuxième étape est le choix des protocoles de vieillissement. Il s'agit d'accélérer les phénomènes de vieillissement sans modifier les mécanismes mis en jeu.

La troisième étape consiste à caractériser l'évolution des propriétés du matériau tout au long du vieillissement. Pour cela une approche multiéchelle et pluridisciplinaire est adoptée (Figure 6). En effet l'évolution des propriétés fonctionnelles sera reliée à l'évolution des propriétés du matériau à l'échelle microscopique. Le développement microbiologique impacte et est impacté par les propriétés physico-chimiques et microstructurales des bétons de chanvre. Ce type de vieillissement sera donc également pris en compte.



**Figure 6 :** Schéma de l'approche multiéchelle et pluridisciplinaire de l'étude de durabilité du béton de chanvre

Enfin, dans une quatrième étape, à partir de l'analyse croisée des différents résultats expérimentaux obtenus, les mécanismes de dégradation du béton de chanvre sont identifiés. Cette étape nous permettra de déterminer des indicateurs de durabilité du matériau et de donner une première estimation de sa durée de vie.

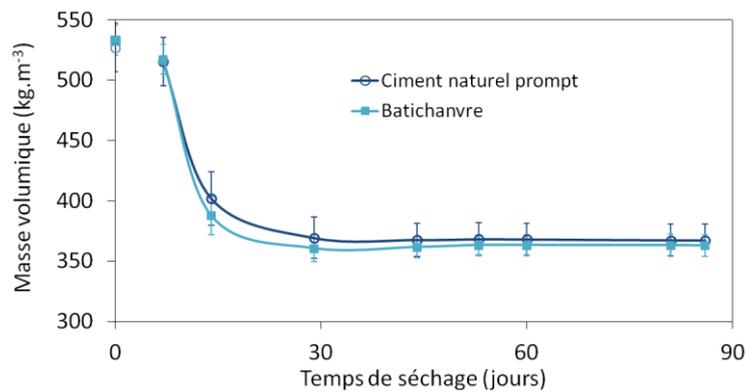
La suite de ce chapitre détaille les deux étapes de la méthodologie qui ont été validées : le choix des matériaux et les protocoles de vieillissement accéléré.

### 3.1. Matériaux

Afin d'étudier en laboratoire des matériaux dont les propriétés sont les plus proches possible de celles des matériaux utilisés dans les bâtiments, deux liants couramment utilisés sur chantier qui respectent les règles professionnelles d'exécution ont été sélectionnés : Le Batichanvre (CESA), composé de chaux naturelles (70%), et de liants hydrauliques et pouzzolaniques (30%) et, afin d'étudier l'impact de la composition chimique du liant sur la durabilité du matériau, le ciment naturel prompt (Vicat). La chènevotte utilisée est l'Isocanna (CESA).

Les éprouvettes de béton ont été fabriquées selon la formulation « Mur » qui est la formulation la plus utilisée dans les bâtiments. Le rapport massique liant/granulat est de 2, soit un rapport volumique liant/granulat d'environ 0,25 et le rapport massique eau/liant est de 1. Une partie de l'eau est absorbée par la chènevotte, l'autre permet la prise hydraulique du liant.

Les éprouvettes de béton de chanvre ont été fabriquées en une seule gâchée pour chaque liant. La chènevotte a été placée dans un malaxeur avec des pâles adaptées à ce type de matériau (malaxeur Hemp eco systems SA). Une première moitié de l'eau est ajoutée et sert à humidifier la chènevotte. Puis le liant est versé, suivi par la seconde moitié de l'eau nécessaire à l'hydratation du liant. Des moules ont été remplis et le béton de chanvre a été compacté manuellement. Pour la totalité des éprouvettes fabriquées, la masse volumique mesurée à l'état frais est de  $530 \pm 16 \text{ kg.m}^{-3}$ . Les éprouvettes ont été démoulées après une semaine afin de garantir un durcissement suffisant des liants pour les manipuler. Une période de 90 jours de séchage dans une chambre à 65% HR et 20°C a permis aux réactions d'hydratation des liants de se faire. Après le démoulage, une diminution de la masse volumique par évaporation d'eau est observée, suivie d'une stabilisation à partir d'environ trente jours de séchage (Figure 7). Dans ces conditions de fabrication, nous avons obtenu des masses volumiques identiques pour les deux formulations (CNP :  $367 \pm 13 \text{ kg.m}^{-3}$  ; Batichanvre :  $363 \pm 9 \text{ kg.m}^{-3}$ ).



**Figure 7 :** Evolution de la masse volumique d'éprouvettes de béton de chanvre (CNP et Batichanvre) pendant la période de séchage (65% HR, 20°C)

### 3.2. Protocoles de vieillissements accélérés

Après 90 jours de séchage, les éprouvettes seront soumises à quatre conditions de vieillissement :

- 1- Un vieillissement en chambre climatique permettant d'appliquer des cycles d'humidification/séchage afin d'étudier le vieillissement environnemental.

Lorsque les éprouvettes de bétons de chanvre sèches sont exposées à une humidité de 40% HR, la teneur en eau atteinte par le matériau est d'environ 2% [COL13]. La prise de masse entre 0 et 40% HR semble suffisamment faible pour fixer le premier palier d'humidité à 40% HR. Le second palier est fixé à 98% HR, correspondant à la plus forte humidité. Une température constante de 30°C sera imposée pour ne faire varier qu'un seul paramètre, l'humidité relative, et d'autre part pour accélérer légèrement les phénomènes physico-chimiques de vieillissement. Ces cycles seront appliqués pendant des périodes plus longues que dans l'étude de Marceau et al. [MAR15] pour pouvoir observer des variations significatives des propriétés des matériaux.

- 2- Un vieillissement biologique permettant l'étude de l'impact de microorganismes sur les propriétés des bétons de chanvre.

Les éprouvettes seront placées dans des conditions favorables au développement microbiologique (>98% HR, 30°C). Afin de favoriser ce développement, certaines éprouvettes seront inoculées par une suspension de microorganismes préalablement identifiés dans la chènevotte non exposée.

- 3- Un vieillissement naturel en milieu extérieur en région parisienne afin d'étudier l'influence des variations climatiques réelles sur les propriétés des matériaux.
- 4- Enfin, un stockage d'éprouvettes en laboratoire (50% HR, 20°C), utilisé comme référence, permettra de suivre l'évolution des propriétés des bétons de chanvre ne subissant pas de contraintes particulières.

#### 4. Conclusions et perspectives

La méthodologie d'étude de la durabilité du béton de chanvre présentée dans cet article est fondée sur une étude bibliographique qui nous a permis d'identifier et de sélectionner les facteurs influents sur la modification des propriétés du matériau (variations d'humidité relative, présence de microorganismes et alcalinité du milieu apportée par le liant minéral).

Deux formulations de bétons de chanvre de type Mur, respectant les recommandations des Règles Professionnelles d'exécution de Construire en Chanvre, ont été réalisées, l'une avec un liant formulé à base de chaux (Batichanvre) et l'autre avec un ciment prompt naturel (CNP). Une même chènevotte (Isocanna) est utilisée avec les deux liants.

Les éprouvettes fabriquées en laboratoire ont tout d'abord durci pendant 90 jours (65% HR – 20°C) afin d'assurer l'hydratation des liants. Ensuite elles subiront différents protocoles de vieillissement en laboratoire : un vieillissement environnemental simulant les variations d'humidité, un vieillissement microbiologique et un vieillissement naturel extérieur. Les modifications de propriétés fonctionnelles et microscopiques du matériau soumis à ces différents protocoles seront comparées à celles mesurées sur des éprouvettes de référence stockées dans un laboratoire à température et hygrométrie contrôlées.

#### 5. Bibliographie

- [ARI15] ARIZZI A., VILES H., MARTIN-SANCHEZ I., CULTRONE G., "Predicting the long-term durability of hemp-lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations", *Science of the Total Environment*, 542, 2015, p. 757-770.
- [CeC12] ASSOCIATION CONSTRUIRE EN CHANVRE, « Règles Professionnelles d'exécution », SEBTP, 2012.
- [COL08] COLLET F., BART M., SERRES L., MIRIEL J., "Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, p. 1271-1280.
- [COL13] COLLET F., CHAMOIN J., PRETOT S., LANOS C., "Comparaison of hygric behaviour of three hemp-concretes", *Energy and Buildings*, Vol. 62, 2013, p. 294-303.
- [GLE13] GLE P., Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation, Thèse de doctorat, ENTPE Lyon, 2013.
- [GOU14] GOURLAY E., 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 de doctorat, ENTPE de Lyon, 2014.
- [MAR15] MARCEAU S., GLÉ P., GUEGUEN M., GOURLAY E., MOSCARDELLI S., NOUR I., AMZIANE S., ABDELLAOUI L., "Assessment of the durability of bio-based insulating materials", *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Bio-Based Building Materials*, Eds. : Amziane S. & Sonebi M., Associate Ed. : Charlet K. ; RILEM Publications S.A.R.L. ; ISBN PRO 99: 978-2-35158-154-4 ; 2015.
- [MEL13] MELO FILHO J.A., ANDRADE SILVA F. de, TOLEDO FILHO R.D., "Degradation kinetics and ageing mechanisms on sisal fiber cement composite systems", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 40, 2013, p. 30-39.
- [PEJ08] PEJIC B. M., KOSTIC M.M., SKUNDRIC P.D., PRASKALO J.Z., "The effect of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers", *Bioresource Technology*, Vol. 99, 2008, p. 7152-7159.
- [WEI15] WEI J., MEYER C., "Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites", *Cement and Concrete Research*, Vol. 73, 2015, p. 1-16.