
Durabilité du béton de chanvre soumis à des cycles d'humidification-séchage

Delannoy G.¹

¹ Université Paris-Est, MAST/CPDM, IFSTTAR, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France : guillaume.delannoy@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. Des matériaux à base de granulats végétaux, comme le béton de chanvre, sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique, le confort acoustique et hygrothermique des bâtiments, tout en valorisant des ressources renouvelables. Cependant l'absence de données sur les performances à long terme du matériau est un frein au développement de cet isolant. L'objectif de cette étude portant sur la durabilité du béton de chanvre est d'identifier les mécanismes de vieillissement du matériau, en utilisant une approche pluridisciplinaire et multiéchelle. Deux formulations de bétons de chanvre sont ainsi soumises à deux types de conditions environnementales pendant 2 ans, avec comme facteurs de vieillissement la température et les variations d'humidité relative. L'évolution des propriétés fonctionnelles (thermiques, acoustiques et mécaniques) est suivie et reliée à l'évolution des propriétés microstructurales et chimiques. Les résultats montrent qu'en conditions normales de laboratoire, les propriétés du matériau sont maintenues. Le vieillissement accéléré permet d'observer des évolutions de propriétés fonctionnelles, qui proviennent d'une modification de la chimie du minéral et de la microstructure du végétal, avec un impact des microorganismes.

ABSTRACT. Vegetal aggregates-based materials, as hemp concrete, are used to improve thermal insulation, acoustical and hygrothermal performances for a better living comfort in buildings, by using renewable resources. Hemp concrete is frequently used. However, the lack of knowledge about its long-term performances is a limitation to the development of the material. Therefore, the objective of this study of durability is to identify the ageing mechanisms of hemp concrete by using a pluridisciplinary and multiscale approach. Two hemp concrete formulations are aged for two years under two different environmental conditions, the factors of ageing used are temperature and variations of relative humidity. The evolution of functional properties (thermal, acoustical and mechanical) is followed and related to the evolution of microstructure and chemistry of the different components. The results show that under static laboratory conditions, the properties of hemp concrete are stable with time. The accelerated ageing allows changes in the functional properties with time, due to modifications of the binder chemistry and of the microstructure of vegetal aggregates, with an action of microorganisms.

MOTS-CLÉS: béton de chanvre, matériau biosourcé, durabilité, vieillissement accéléré, mécanismes de vieillissement, multiéchelle.

KEY WORDS: hemp concrete, biobased material, durability, accelerated ageing, ageing mechanisms, multiscale.

1. Introduction

Le béton de chanvre est un matériau isolant utilisé pour ses propriétés thermiques, hygrothermiques et acoustiques [AMZ 17]. Il est composé de granulats végétaux, appelés chènevotte, qui sont enrobés et liés par une fine couche, inférieure à 0,5 mm, de liant minéral. La microstructure, et notamment la grande porosité de la chènevotte, apporte les propriétés fonctionnelles du matériau [DEL 17].

Un retour terrain important sur des constructions réelles [AQC 16] a permis d'identifier des problèmes de mise en œuvre dans les premières constructions, qui ont depuis été largement corrigés, notamment avec l'apparition de règles de construction [CeC 12]. La question de l'évolution des performances à long terme du matériau se pose donc maintenant. De premières études ont porté sur la durabilité de bétons de chanvre. Afin d'observer des évolutions de propriétés fonctionnelles ou de microstructures, des vieillissements accélérés sont utilisés à l'aide de variations d'humidité relative [ARI 16] [MAR 17a], des immersions dans l'eau [SEN 17] ou des cycles de gel-dégel [WAL 14] [SAS 15]. La présence d'eau est en effet un facteur à risque pour la durabilité du béton de chanvre. De plus, le caractère hydrophile de la chènevotte entraîne un gonflement des particules, et ainsi des contraintes à l'interface entre le granulat et le liant [NOZ 12]. De plus, en présence d'eau et de liants minéraux, un pH élevé peut être atteint au sein du matériau, ce qui engendre des dégradations alcalines, tout comme une minéralisation des végétaux [WEI 15]. La valeur d'humidité relative appliquée a aussi une incidence sur l'évolution du liant, et notamment sur la cinétique de carbonatation [CHA 15].

Des temps de vieillissement trop courts expliquent les faibles variations de propriétés observées pour les études de durabilité ayant choisi l'hygrométrie comme facteur de vieillissement [MAR 17b]. Néanmoins ce type de vieillissement est plus proche des conditions réelles d'utilisation du matériau, et n'implique pas des modifications de structure. En effet, une lixiviation de matières organiques ou minérales est observée lors des cycles d'immersion, qui correspondent plutôt à des conditions accidentelles de type dégât des eaux dans un bâtiment. C'est pour cette raison que l'étude présentée dans cet article utilise comme vieillissement accéléré des cycles d'humidification et de séchage, en appliquant des variations d'humidité relative, à température favorable au potentiel développement de microorganismes. Une approche multiéchelle et pluridisciplinaire permet de mettre en évidence et de relier les éventuelles évolutions de propriétés fonctionnelles (thermique, acoustique et mécanique) avec l'évolution des propriétés microstructurales et physicochimiques de bétons de chanvre. Afin d'étudier l'impact de la formulation sur l'ensemble des propriétés à long terme, deux liants, avec une composition chimique différente et couramment utilisés sur chantier sont retenus.

Dans un premier temps, la caractérisation des propriétés fonctionnelles, microstructurales et chimiques est présentée en fonction du temps, du type de vieillissement et du type de liant utilisé. Ensuite, l'analyse et le lien entre l'ensemble des propriétés du matériau sont discutés.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

Une chènevotte commerciale vendue pour une application d'isolation est sélectionnée pour cette étude.

Deux liants différents utilisés pour l'application béton de chanvre sont retenus :

- Un ciment naturel, appelé CN
- Un liant formulé à base de chaux, appelé FC

2.2. Fabrication et cure des bétons de chanvre

Les deux formulations de bétons de chanvre sont réalisées selon les règles de construction de Construire en Chanvre pour une formulation Mur. Le rapport Liant/Chènevotte est de 2, et le rapport Eau totale/Liant est de 1 [CeC 12]. Le béton de chanvre frais est inséré dans des moules et compacté manuellement pour obtenir une masse volumique à l'état frais de 530 kg.m^{-3} . Les éprouvettes sont démoulées à 7 jours, puis placées dans une pièce à 65% HR et 20°C pendant 83 jours pour permettre le durcissement et le séchage des éprouvettes. A l'issue de la période de cure, les éprouvettes ont une masse volumique d'environ 350 kg.m^{-3} . Les bétons de chanvre utilisant le ciment naturel ou le liant formulé à base de chaux sont respectivement appelés BC-CN et BC-FC.

2.3. Protocoles de vieillissement

Après la cure, les éprouvettes sont réparties en deux lots et sont placées dans deux conditions différentes de vieillissement pendant 2 ans.

- Le vieillissement servant de référence V_{Ref} permet de suivre l'évolution des propriétés du matériau sans contrainte particulière. Les éprouvettes sont placées dans une pièce à 50% HR et 20°C.
- Un vieillissement accéléré, appelé V_{HS} , est choisi en utilisant des cycles de variations d'humidité relative à température constante de 30°C dans une enceinte climatique. Une période d'humidification de 5 jours à 98% HR est appliquée, suivie d'une période de 2 jours de séchage à 40% HR.

Les propriétés du matériau sont mesurées avant le vieillissement (V_0), puis à échéance régulière sur une période de 2 ans sur des éprouvettes préalablement séchées 48h à 40°C.

2.4. Caractérisations

La conductivité thermique λ est mesurée à l'aide d'un système de disque chaud (HotDisk). La sonde est placée entre deux éprouvettes de 4 cm d'épaisseur et 10 cm de diamètre.

Le coefficient d'absorption acoustique α est mesuré à l'aide d'un tube de Kundt (Acoustitube AFD) sur une plage de fréquence de 250 à 2000 Hz, avec les éprouvettes utilisées en thermique. $\alpha(f)$ est comprise entre 0 (aucune absorption) et 1 (totale absorption).

Les éprouvettes sont testées mécaniquement en compression sur des éprouvettes de 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur à l'aide d'une presse Zwick avec un déplacement contrôlé à 3 mm/min.

Une analyse des phases minérales est réalisée par analyse thermogravimétrique.

La porosité ouverte à l'air est mesurée à l'aide d'un porosimètre comme décrit dans [DEL 18].

Des observations de la microstructure sont réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage FEI Quanta 400 en mode SE et BSE.

3. Résultats

3.1. Propriétés fonctionnelles

Les résultats de conductivité thermique pour les deux formulations de bétons de chanvre et pour les deux types de vieillissement sont présentés Figure 1. Pour le vieillissement V_{Ref} , aucune variation de conductivité thermique n'est observée. En revanche avec le vieillissement V_{HS} , une augmentation de la conductivité thermique est visible. Cette augmentation est plus marquée pour BC-FC (19%) que pour BC-NC (7%).

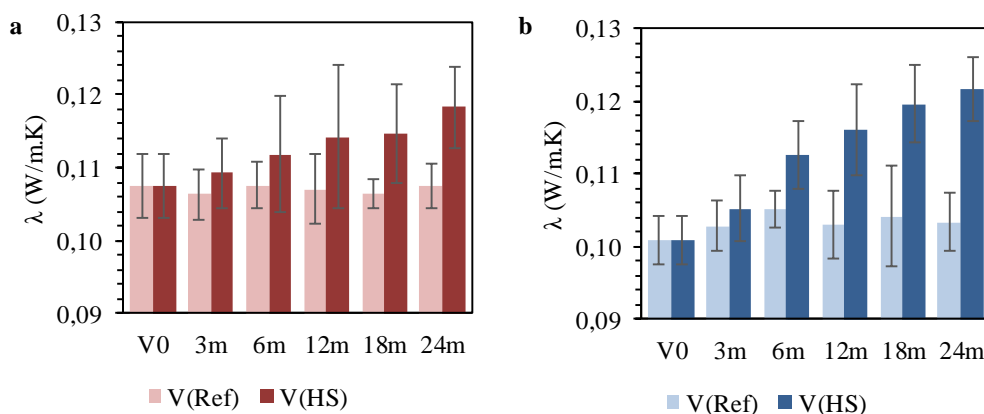


Figure 1. Conductivité thermique en fonction du vieillissement pour BC-CN (a) et BC-FC (b)

Le comportement acoustique des bétons de chanvre est présenté Figure 2. Pour les deux formulations, aucune différence n'est relevée pour V_{Ref} , les résultats sont donc représentés sous forme d'une aire représentant le fuseau de l'ensemble des mesures entre 0 et 24 mois. Pour le vieillissement V_{HS} , aucune variation significative n'est visible pour BC-CN. En revanche pour BC-FC, on observe un décalage de la courbe vers les basses fréquences, avec une diminution de la valeur maximale. Ce décrochage se passe entre 0 et 3 mois, les autres courbes ne variant pas de manière significative.

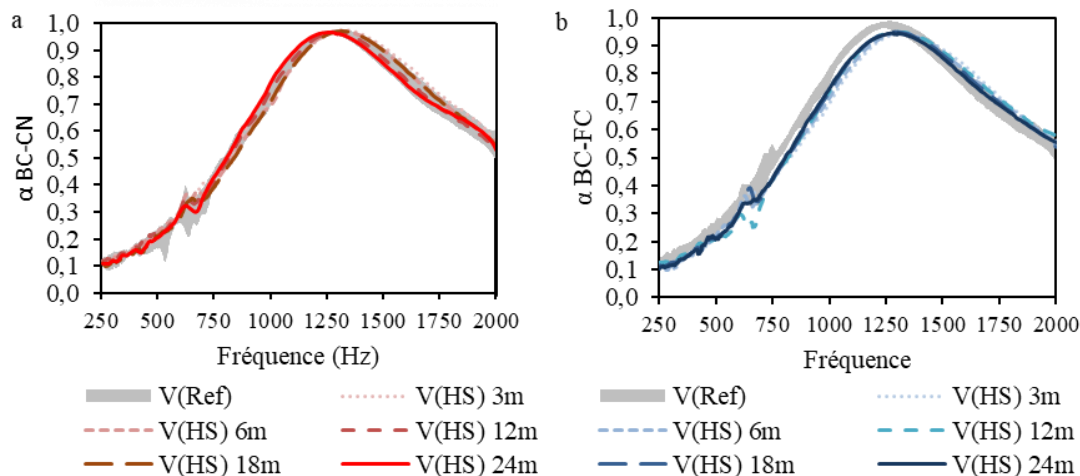


Figure 2. Coefficient d'absorption acoustique pour BC-CN (a) et BC-FC (b) soumis aux vieillissements V_{Ref} (faisceaux de courbes sur 24 mois) et V_{HS}

Les résultats de résistance en compression des éprouvettes de bétons de chanvre sont présentés Figure 3. Au vu des résultats et de leur dispersion, aucune évolution du comportement mécanique n'est relevée. Comme discuté dans [DEL 18], les faibles résistances mécaniques observées proviennent d'une mauvaise hydratation des liants qui est inhibée par les molécules extractibles du chanvre, comme les sucres.

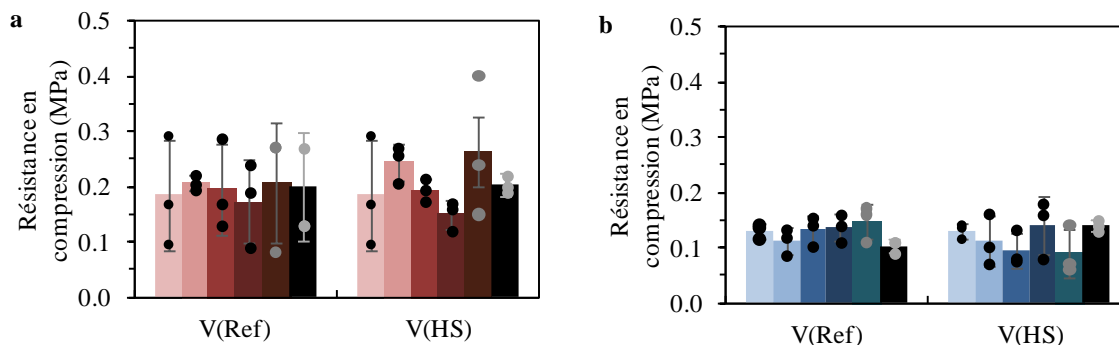


Figure 3. Moyennes (histogrammes) et valeurs mesurées (points) de la résistance en compression pour BC-CN (a) et BC-FC (b) soumis aux vieillissements V_{Ref} et V_{HS}

3.2. Propriétés microstructurales

La variation massique des éprouvettes est présentée Figure 4. On observe dans un premier temps en vieillissement Ref une perte de masse entre 2% et 3% respectivement pour BC-CN et BC-FC. Cela est dû à la perte de particules lors des manipulations des échantillons. En revanche pendant V_{HS} , une augmentation de masse est visible au cours du temps et de manière plus marquée pour BC-FC. Cette augmentation a lieu jusqu'à 18 mois, puis la masse semble se stabiliser à 24 mois. En considérant la perte de masse due aux manipulations des éprouvettes observée sur V_{Ref} , la prise de masse d'un échantillon peut être estimée à 10% et 5% respectivement pour BC-FC et BC-CN.

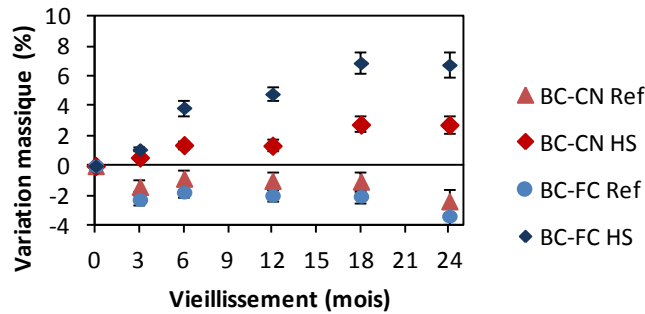


Figure 4. Variation massique d'éprouvettes de bétons de chanvre pour BC-CN et BC-FC soumis aux vieillissements V_{Ref} et V_{HS}

La porosité ouverte à l'air est présentée Figure 5. Cette valeur est stable pour le vieillissement V_{Ref} . En revanche, la valeur de porosité ouverte augmente en V_{HS} pour BC-CN et BC-FC jusqu'à 18 mois, puis semble avoir atteint son maximum. Avec des valeurs de porosité ouverte initialement différentes, on observe que l'augmentation est d'un peu plus de 3% de porosité pour les deux formulations.

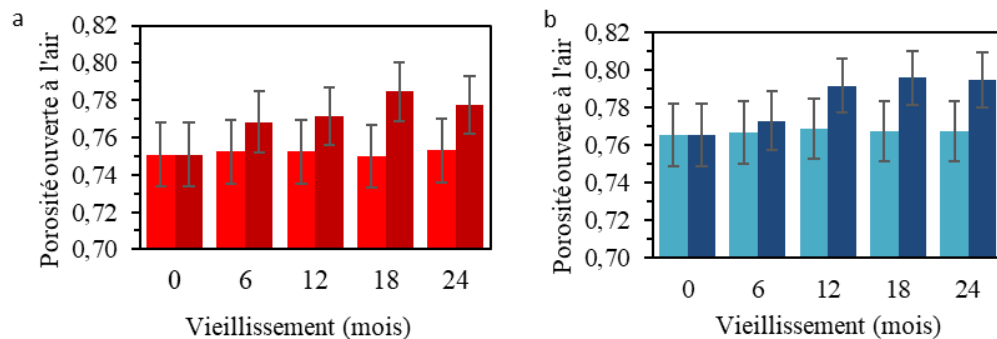


Figure 5. Porosité ouverte à l'air pour BC-CN (a) et BC-FC (b) soumis aux vieillissements V_{Ref} et V_{HS}

Les observations au microscope électronique à balayage sur BC-CN (Figure 6-a et b) et BC-FC (Figure 6-c et d) sont réalisées sur des coupes longitudinales et transversales. Sur les coupes longitudinales, des hyphes sont visibles à l'intérieur de la chènevotte pour BC-CN ainsi que des perforations dans la structure de la chènevotte dans BC-FC.

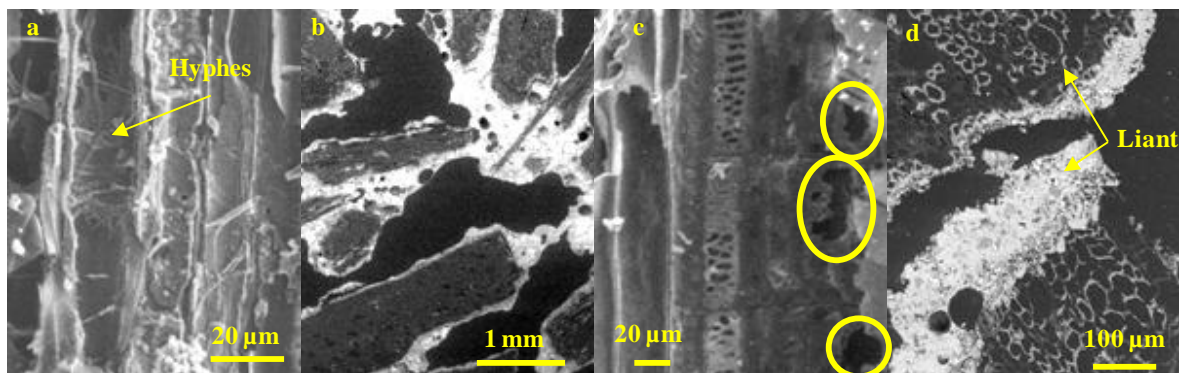


Figure 6. Images MEB en coupe longitudinale (mode SE) de BC-CN (a) et BC-FC (c) et en coupe transversale (mode BSE) de BC-CN (b) et BC-FC (d)

Les coupes transversales montrent une minéralisation importante de la chènevotte pour BC-FC (Figure 6-d), alors qu'elle est peu visible pour BC-CN (Figure 6-b).

3.3. Propriétés chimiques

La synthèse des résultats des analyses thermogravimétriques sur la partie minérale est présentée Figure 6 pour BC-CN (Figure 6-a) et BC-FC (Figure 6-b), sur la poudre de liant, à V_0 et en fonction des vieillissements. On observe qu'entre la poudre de liant et les résultats à V_0 , l'hydratation n'est complète ni pour CN ni pour FC, comme observé précédemment [DEL 18]. Pour BC-CN, on n'observe pas de différence entre V_0 et V_{Ref} à 12 mois et 24 mois. Environ 20% du liant reste sous forme anhydre. En revanche, pendant le vieillissement V_{HS} , l'hydratation et la carbonatation du liant reprennent lentement. Pour BC-FC, l'hydratation est peu avancée à V_0 et une majeure partie de la portlandite initiale a carbonaté. Comme pour le BC-CN, l'hydratation et la carbonatation ne progressent pas en V_{Ref} et reprennent pendant le vieillissement V_{HS} .

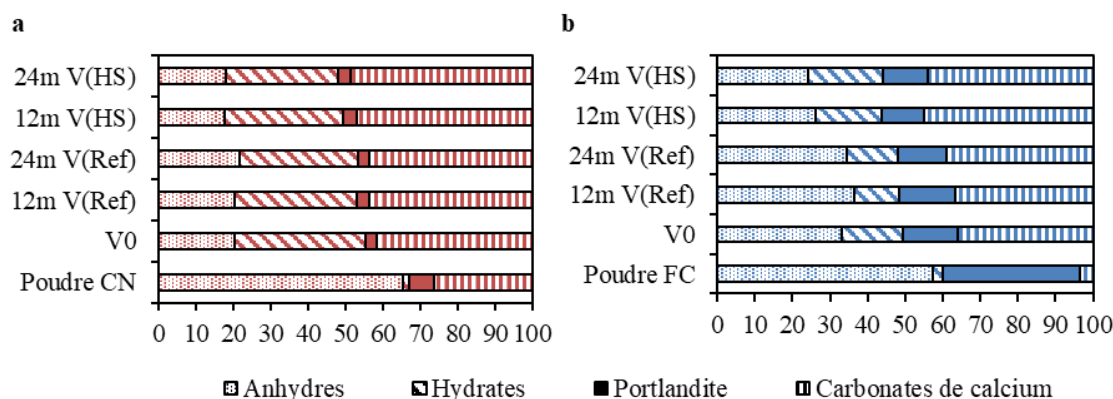


Figure 7. Résultats des analyses thermogravimétriques sur le liant de BC-CN et BC-FC, sur la poudre de liant, V_0 , et V_{Ref} et V_{HS} à 12 et 24 mois

4. Discussion

Le vieillissement statique en conditions stables de laboratoire V_{Ref} et le vieillissement accéléré V_{HS} donnent des résultats différents.

Vieillessement V_{Ref}

A 50% HR et 20°C, on n'observe aucune évolution de propriétés fonctionnelles, que ce soit au niveau thermique, acoustique ou mécanique. Cela est expliqué par une conservation de la microstructure même après 2 ans de vieillissement dans ces conditions. La chènevotte ne semble pas se dégrader, et les conditions hygrothermiques du vieillissement ne permettent pas de reprendre l'hydratation et la carbonatation du liant. Le matériau est donc stable dans ces conditions.

Vieillessement V_{HS}

Avec le vieillissement V_{HS} , des évolutions de propriétés fonctionnelles, microstructurales et chimiques sont cette fois visibles.

Concernant la formulation de béton de chanvre à base de ciment naturel BC-NC, une augmentation de 7% de la conductivité thermique est mesurée (Figure 1-a), alors qu'aucune variation significative n'est observée pour le comportement acoustique ou mécanique (Figure 2-a et 3-a). L'étude de la microstructure nous montre une augmentation de la masse de 2% des éprouvettes (Figure 4), ainsi qu'une augmentation de la porosité de 3% (Figure 5). L'origine de cette prise de masse est la reprise de l'hydratation et de la carbonatation du liant qui ne sont pas complètes au terme de la période de cure et qui continuent pendant V_{HS} . La densification de la partie minérale est responsable de l'augmentation de la conductivité thermique, une pâte de chaux aérienne et une pâte de ciment ayant respectivement une conductivité thermique 3,6 et 6,8 fois supérieure à celle de la chènevotte [GOU 14].

En revanche, les phénomènes d'hydratation ou de carbonatation entraînent normalement une diminution de la porosité [CHA 15], ce qui n'est pas le cas ici. Une étude complémentaire sur le vieillissement de la chènevotte seule montre une augmentation de la porosité ouverte de l'ordre de 8% après 24 mois pendant V_{HS} , due principalement à une ouverture de pores initialement fermés par le gonflement des particules et par l'action de microorganismes

pouvant se développer au sein du matériau. Dans le cas de BC-CN, un développement de microorganismes est aussi visible à l'intérieur de la chènevotte sur BC-CN (Figure 6-a). Une perte de masse de la chènevotte due à la dégradation par les microorganismes peut être masquée par la prise de masse de la partie minérale. L'augmentation de porosité ouverte n'est pas aussi importante que pour la chènevotte seule, pouvant indiquer une dégradation de la structure de la chènevotte moins importante en présence de liant.

Concernant la formulation à base de chaux, BC-FC, une augmentation de 3% de la porosité ouverte à l'air est aussi mesurée, ainsi qu'une trace de l'impact des microorganismes sur la paroi cellulaire. La modification de structure de la chènevotte est donc similaire quelle que soit la formulation utilisée. En revanche, cette formulation entraîne une augmentation plus importante de la masse pendant V_{HS} (8% contre 3% pour BC-CN), et une augmentation de la conductivité thermique là aussi plus importante (19% contre 7% pour BC-CN). En effet les résultats d'ATG (Figure 6) nous montrent de plus grandes évolutions de la partie minérale, avec notamment une diminution de 10% du taux d'anhydres contre moins de 5% pour BC-NC, associé à une augmentation de 5% du taux de carbonates de calcium pour les deux bétons après 24 mois en V_{HS} comparé à 24 mois V_{Ref} .

Contrairement à BC-CN, le comportement acoustique de BC-FC évolue avec le vieillissement HS entre 0 et 3 mois, puis n'évolue plus jusqu'à 24 mois. La portlandite, fortement présente dans le liant formulé FC est un composé soluble dans l'eau. Les cycles d'humidification vont entraîner une dissolution de la portlandite, qui va ensuite migrer à l'intérieur de la porosité de la chènevotte [WEI 15]. Lors du séchage, cette portlandite va reprécipiter dans les pores des granulats. Cette minéralisation est majoritairement observée au MEB pour BC-FC, entraînant une diminution de la tortuosité, et donc une modification du comportement acoustique [GLE 12].

Il est donc possible d'estimer que deux phénomènes ont lieu simultanément pour les deux formulations : à la fois une densification de la partie minérale par reprise de l'hydratation et de la carbonatation avec V_{HS} , mais aussi une attaque des microorganismes au sein de la chènevotte, entraînant l'augmentation de la porosité ouverte.

La composition chimique du liant a une influence sur les propriétés à long terme du béton de chanvre. En effet, l'utilisation de chaux entraîne des modifications plus importantes dans la microstructure de la partie minérale, qui vont impacter les propriétés fonctionnelles telles que la conductivité thermique ou l'absorption d'eau.

En revanche, malgré la reprise d'hydratation et de carbonatation pendant le vieillissement V_{HS} , les propriétés mécaniques ne sont pas améliorées, quel que soit le liant. Il est possible qu'un gain de propriétés mécaniques apporté par la densification du liant soit contrebalancé par une dégradation de la chènevotte.

5. Conclusion

La première conclusion de cette étude est qu'à 50% HR et 20°C, aucune modification de propriétés fonctionnelles, microstructurales ou chimiques n'est observée pendant 2 ans. Quelle que soit la formulation, l'une à base de ciment naturel, l'autre à base d'un liant formulé à base de chaux, le matériau reste stable dans le temps dans ces conditions.

L'application d'un protocole de vieillissement accéléré de bétons de chanvre sous contrainte hygrique a permis de mettre en évidence des évolutions de propriétés fonctionnelles, microstructurales et chimiques sur les deux formulations. Deux grands mécanismes semblent opérer simultanément: une densification de la partie minérale par hydratation et carbonatation des liants au cours du vieillissement, mais aussi une dégradation de la chènevotte par des microorganismes. La densification de la partie minérale entraîne une augmentation de la masse des bétons, mais aussi de leur conductivité thermique. L'attaque de la chènevotte est elle visible par une augmentation de la porosité ouverte, la dégradation de la paroi végétale permettant l'accès à une porosité intraparticulaire initialement fermée.

La composition chimique des liants modifie les propriétés microstructurales des bétons de chanvre. La présence de chaux va notamment entraîner une plus grande modification de la partie minérale par carbonatation et minéralisation des pores de la chènevotte. Ces modifications se répercutent sur les propriétés fonctionnelles. En effet, un changement de comportement acoustique n'est observé que pour la formulation à base de chaux, la portlandite étant soluble dans l'eau et sujette à une migration sous contrainte hydrique. Ce liant est aussi plus sensible à la carbonatation, associée à une prise de masse et donc à une augmentation de conductivité thermique plus importantes.

Enfin, aucune évolution des propriétés mécaniques n'est observée, les effets de la reprise d'hydratation et de carbonatation étant contrebalancés par une fragilisation du végétal.

6. Bibliographie

- [AMZ 17] AMZIANE S. & COLLET F., *Bio-aggregates Based Building Materials, RILEM State-of-the-Art reports*, vol. 23, 2017, Dordrecht, Springer.
- [AQC 16] AGENCE QUALITE CONSTRUCTION, « Isolants biosourcés : points de vigilance », 2016, ISBN : 978-2-35443-572-1 9782354435721.
- [ARI 16] ARIZZI A., VILES H., MARTIN-SANCHEZ I. and 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 Total Environment*, vol. 542, 2016, p. 757-770.
- [CeC 12] *Construire en chanvre – Règles professionnelles d'exécution*, SEBTP, 2012, Paris.
- [CHA 15] CHABANNES M., E. GARCIA-DIAZ E., CLERC L., BÉNÉZET J.-C., "Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation", *Construction and Building Materials*, vol. 94, 2015, p. 105-115.
- [DEL 18] DELANNOY G., MARCEAU S., GLÉ P., GOURLAY E., GUÉGUEN-MINERBE M., DIAFI D., NOUR I., AMZIANE S., FARCAS F., "Influence of binder on the multiscale properties of hemp concretes", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (in press), 2018, DOI: 10.1080/19648189.2018.1457571.
- [GLE 12] GLÉ P., GOURDON E., ARNAUD L., "Modelling of the acoustical properties of hemp particles", *Construction and Building Materials*, vol. 37, 2012, p. 801-811.
- [GOU 14] Gourlay E., Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre, Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2014.
- [MAR 17] MARCEAU S., GLÉ P., GUÉGUEN-MINERBE M., GOURLAY E., MOSCARDELLI S., NOUR I., AMZIANE S., « Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 139, 2017, p. 524-530.
- [MAR 17-b] MARCEAU S. and DELANNOY G., "Durability of Bio-based concretes" in *Bio-aggregates Based Building Materials, RILEM State-of-the-Art reports*, vol. 23, 2017, p. 167-187, Eds. Amziane S. and Collet F., Dordrecht, Springer.
- [NOZ 12] NOZAHIC V., Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal, Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 2012.
- [SAS 15] SASSONI E., MANZI S., MOTORI A., MONTECCHI M., CANTI M., "Experimental study on the physical-mechanical durability of innovative hemp-based composites for the building industry", *Energy and Building*, vol. 104, 2015, p. 316-322.
- [SEN 17] SENTENAC C., SONEBI M., AMZIANE S., "Investigation on the performance and durability of treated hemp concrete with water repellent", *Proceedings of the 2nd International Conference on Bio-based Building Materials*, Clermont-Ferrand, 21-23 juin 2017, p. 20-28.
- [WAL 14] WALKER R., PAVIA S. and MITCHELL R., "Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes", *Construction and Buildings Materials*, vol. 61, 2014, p. 340-348.
- [WEI 15] 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.