

---

# Modélisation théorique et expérimentale du comportement énergétique et environnemental des matériaux de construction biosourcés

Maroua BENHALED<sup>1</sup>, Salah-Eddine OULDBOUKHITINE<sup>1</sup>, Sofiane AMZIANE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IUT de Montluçon, Université Clermont Auvergne, Institut Pascal BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, Institut Pascal BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

---

*RÉSUMÉ. L'utilisation du béton végétal comme le béton de chanvre est devenue de plus en plus répandue dans les constructions en remplacement des matériaux classiques traités sous des procédés industriels dans un contexte environnemental critique. Le béton de chanvre est un matériau de remplissage connu pour ses propriétés hygrothermiques et environnementales ainsi que pour le confort induit par ces performances multiphysiques. L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact de ce matériau sur les performances énergétiques du bâtiment selon une approche pluridisciplinaire. La première partie est consacrée à l'état de l'art lié aux usages du béton de chanvre et à ses performances en comparaison aux matériaux classiques du génie civil. Un travail préliminaire qui consiste en une étude bibliographique approfondie portant sur les modèles proposés dans la littérature a été également entrepris. La seconde partie est consacrée à un travail de caractérisation expérimentale sur béton de chanvre permettant d'identifier les paramètres nécessaires au modèle numérique. La troisième partie est dédiée à l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi et d'un local en béton de chanvre soumis à des conditions climatiques statiques et dynamiques dans le but d'évaluer l'impact du matériau sur la demande énergétique ainsi que le confort des usagers.*

*ABSTRACT. The use of vegetal concrete such as hemp concrete has become increasingly widespread in buildings, in constructions replacing conventional materials treated under industrial processes in a critical environmental context. Hemp concrete is a filling material known for its hygrothermal and environmental properties as well as for the comfort induced by its multiphysical performances. The objective of this study is to quantify the impact of this material on the building's energy performance using a multidisciplinary approach. The first part is related to the state of the art on to the uses of hemp concrete and its performance in comparison with traditional civil engineering materials. Preliminary work consisting of an in-depth literature review of the models proposed in the literature was also undertaken. The second part is devoted to an experimental characterization of hemp concrete allowing to identify the parameters necessary for the numerical model. The third part is dedicated to the study of the hygrothermal behaviour of a wall and a room made of hemp concrete subjected to static and dynamic climatic conditions to evaluate the impact of the material on energy demands.*

*MOTS CLES : Béton de chanvre, transfert hygrothermique, HAM, COMSOL, impac énergétique*

*KEY WORDS : Hemp concrete, Hygrothermal transfer, HAM, COMSOL, Energy impact.*

---

## 1. Introduction

Le secteur du bâtiment affecte fortement l'environnement à travers la consommation des ressources naturelles et d'énergie. Ces consommations contribuent aux émissions de gaz à effet de serre. Une des réponses à ces préoccupations énergétiques et environnementales a été l'émergence des règlements actuels qui incitent au développement de solutions innovantes et efficaces notamment les solutions écologiques et durables. En France, on note que les labels de construction de type Haute qualité environnementale (HQE) ou plus récemment Energie Positive / Carbone négatif (E+/C-) s'imposent, tant pour les constructions publiques que privées. Par conséquence, l'intérêt porté sur les matériaux végétaux à faible impact environnemental est naturellement pertinent. Ces matériaux qui lors de la mise en œuvre et pendant leur utilisation, présentent une faible énergie grise, tout en agissant positivement sur la consommation d'énergie. Bien entendu, les mélanges chaux et chanvre sont de bons isolants en ayant un impact favorable sur le confort à l'échelle du bâtiment. Le béton de chanvre a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Ce matériau composite et complexe présente des propriétés hygrothermiques très intéressantes à cause de sa morphologie structurale. En effet, l'enveloppe d'un bâtiment est en interaction constante avec l'ambiance intérieure et extérieure. Dès lors, l'analyse des performances

énergétiques d'un matériau du bâtiment passe par l'étude de son comportement hygrothermique face à des variations de la température et de l'humidité relative. Ce travail de recherche portera sur la modélisation théorique et expérimentale du comportement énergétique et environnemental du béton de chanvre.

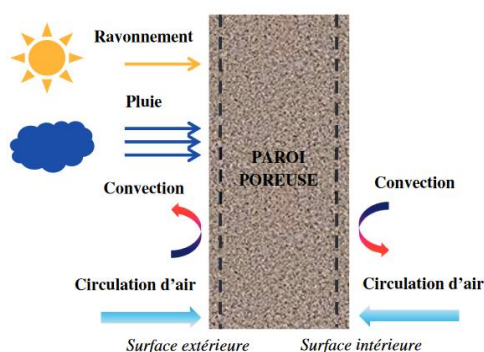
## 2. Etat de l'art

Différents travaux de recherches traitent l'efficacité et la performance de l'utilisation du béton de chanvre dans les constructions. Afin de bien caractériser ces propriétés physiques et surtout thermo-hydrigue, ces études se penchent sur trois niveaux d'échelles : Matériaux, parois et bâtiment. Le but de ces caractérisations est de comprendre leur comportement et mettre en évidence l'intérêt de son utilisation à la place des autres matériaux classiques de construction.

A l'échelle du matériau, les premières études sont portées essentiellement sur l'analyse de la morphologie structurelle, induite par l'association des granulats végétaux poreux à une matrice rigide à base de chaux. Ce composite présente une forte porosité de l'ordre de 80% [Col 2004] et une densité limitée ( $300 < \rho < 600 \text{ Kg/m}^3$ ) [CER 2005]. Sa structure poreuse lui confère des propriétés hygrothermiques très intéressantes : une faible conductivité thermique ( $0.07 < \lambda_{\text{eff}} < 0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) [GLO 2013] et une forte perméabilité au transfert d'humidité. D'après les études menées par Collet et al [COL 2014], la conductivité est fortement influencée par la formulation et la densité des matériaux en plus de l'état hydrique au moment de mesure. En raison de la forte porosité, le béton de chanvre présente 3 phases (liquide, gaz et solide) pouvant se présenter en même temps (cas non saturé). Les transferts de chaleur dans les milieux humides auront lieu simultanément. Cependant, la difficulté d'évaluer la réponse hygrothermique réside dans le couplage des transferts de masse et de chaleur.

D'autre part, les phénomènes mis en jeu à l'échelle microscopique sont à la base des phénomènes impliqués à l'échelle macroscopiques. A cette échelle de la paroi, des analyses expérimentales et des modélisations numériques ont été menées afin d'évaluer le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre sous des conditions de température et d'humidité relative contrôlées [LEL 2015] [AIT 2013]. En faveur de ces expériences, le béton de chanvre montre son pouvoir de « stockage tampon » et sa capacité d'atténuer les oscillations de l'humidité relative extérieure et de réduire la consommation énergétique. Ait et al [AIT 2012] a mis en évidence l'importance de prendre en compte le phénomène de l'hystérésis dans les transferts couplés de chaleur et de masse.

La prise en compte du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe a une influence directe sur la demande énergétique du bâtiment. De ce fait, différents modèles ont décrit le transfert hygrothermique au niveau d'une paroi ainsi que le couplage avec l'ambiance habitable, puis les ont validé en utilisant des outils de validation variés HAM (Heat, Air and Moisture) [AIT 2013] [TRA 2013]. Une stratégie a été adoptée pour suivre l'évolution de la température et l'humidité dans le mur en béton de chanvre en utilisant des capteurs instrumentés dans différents endroits et à la proximité de mur-test [LEL 2015]. Cette paroi est soumise à des sollicitations en T (°C) et HR (%) contrôlées similaires à l'ambiance réelle (intérieure et extérieure) (Fig. 1). Les changements climatiques sont imposés par une enceinte bi-climatique (Fig. 2 cellule utilisée dans le cadre de cette étude). Yates [YAT 2002] a conclu que pour deux différents bâtiments sous les mêmes conditions, la température du bâtiment en béton de chanvre est 1 °C plus élevée en comparaison avec une maison en brique. Maalouf et al [MAA 2013] a montré que le béton végétal dans les bâtiments induit une surchauffe dans le milieu habitable pendant l'été.



**Fig.1** Conditions aux limites extérieures et intérieures d'une paroi [AIT 2013]



**Fig.2** La cellule thermique bi climatique IUT Allier et Institut Pascal

### 3. Approche numérique et expérimental

De nombreux travaux ont été consacrés à la modélisation des transferts de chaleur et de masse au sein de la paroi en béton végétal soumise à des variations externes de températures [COL 2004] [AIT 2011] [LEL 2015]. En revanche, peu de recherches ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de ce matériau sur les performances énergétiques du bâtiment en traitant le confort dans le milieu habitable. Ce travail de recherche portera sur une analyse expérimentale et numérique à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Par ailleurs, une amélioration du modèle HAM [AIT 2013] sera mise en œuvre sur le logiciel Comsol multiphysics en intégrant le paramètre de pression, la convection, la thermo-migration de la phase liquide et de l'hystérésis en régime dynamique (influence de la température sur les isothermes de sorption). Ce modèle permet d'appréhender l'influence de ces paramètres sur les transferts hygrothermiques ainsi que sur la demande énergétique. Des campagnes de mesures vont être également réalisées sur des constructions végétales pour valider les modèles développés et quantifier par la suite l'impact énergétique du matériau à base de chanvre sur les besoins énergétiques en chauffage et climatisation. Dans ces travaux, le modèle mathématique adopté est celui développé par [ABA 2012].

### 4. Présentation du modèle de HAM

Selon [ABA 2012], les équations de conservation de masse et d'énergie sont décrites pour toutes les phases considérées. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, les équations sont définies en fonction des moteurs de transferts donnés par : la teneur en eau, la température et la pression totale. Les équations de bilan d'énergie et de masse pour chaque phase en présence sont établies. L'équation du bilan de la phase liquide (1), de la phase vapeur (2), le bilan d'air sec (3) et le bilan d'énergie (4), sont définies par les formulations locales suivantes.

$$\frac{\partial u_l}{\partial t} = -\text{div}(j_l) + \dot{m} \quad [1]$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -\text{div}(j_a) \quad [3]$$

$$\frac{\partial u_v}{\partial t} = -\text{div}(j_v) - \dot{m} \quad [2]$$

$$c\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(j_q) - h_v \dot{m} \quad [4]$$

La densité du flux de chaleur s'exprime donc par :

$$j_q = -\lambda \nabla T + h_l j_l + h_v j_v$$

Avec :

$u_l, u_v, u_a$  [kg/m<sup>3</sup>] sont les teneurs en eau liquide, vapeur et air sec, respectivement. Elle est donnée aussi par la relation  $u = \omega \cdot \rho$ .

$j_i$  [kg/m<sup>2</sup>s] est la densité du flux massique de la phase  $i$  ( $i = v$  pour la phase vapeur,  $i = l$  pour la phase liquide et  $i = g$  pour la phase gazeuse),

-  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] est la masse volumique à l'état sec de l'échantillon

-  $\dot{m}$  [kg/m<sup>3</sup>s] est le taux de changement de phase,

-  $C$  [J/kg.K] est la capacité thermique du matériau,

-  $j_q$  [J/m<sup>2</sup>s] est la densité du flux de chaleur,

-  $h_v$  [J/kg] est l'enthalpie massique

-  $\omega$  [kg/kg] est la teneur en eau,

-  $T$  [K] est la température

-  $\lambda$  : La conductivité thermique

Pour affiner ce modèle, diverses caractérisations expérimentales des matériaux de béton de chanvre à base des liants minérales vont être effectuées.

### 5. Conclusion

Le béton de chanvre est un matériau de plus en plus préconisé dans les nouvelles constructions. Ce composé chaux /chanvre a de nombreux atouts, notamment son faible impact environnemental tout au long de son cycle de vie. Ce matériau est fortement hygroscopique en raison de sa porosité élevée qui lui confère un bon pouvoir

d'isolation ainsi que la capacité de modérer l'ambiance habitable en humidité relative. Cependant, le contact avec un environnement non contrôlé, peut fortement impacter les principales caractéristiques. Les transferts à travers la paroi sont également influencés par les conditions aux limites. L'objectif de ce travail est donc d'étudier à l'échelle de la paroi les phénomènes de transferts hygrothermique en s'appuyant sur des résultats d'expérimentations réalisées en ambiance contrôlée. Un modèle de transferts sera développé dans le but de reproduire les phénomènes de transfert hygrothermique ainsi que des interactions ambiance /paroi.

## 6. Bibliographie

- [ABA 2012] Abahri, K. Modeling of coupled heat, air and moisture transfer in porous building materials. La Rochelle University » 2012.
- [AIT 2011] Aït Ouméziane Y. Bart M. Moissette S. Lanos C., « Modélisation du transfert d'air, de masse et de chaleur aux travers de parois multicouches », Actes du X<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois (CIFQ 2011), Chicoutimi, Canada, 20-22 juin 2011.
- [AIT 2012] Aït Ouméziane Y., Moissette S., Bart M., Lanos C., "Effect of coating on the hygric performance of a hemp concrete wall", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Building Physics Conference IBPC 2012, Kyoto, Japon, 28-31 mai 2012 .
- [AIT 2013] Ait Oumeziane. Y Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre 2013.
- [CRA 1996] Crausse P., Laurent J.P. & Perrin B., (1996). Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrigue de parois de bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, 35(410), pp.95-106.
- [CER 2013] CERESO.V Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, 2005.
- [COL 2004] Collet F. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2004..
- [COL 2014] COLLET. F PRETOT.S Thermal-conductivity of hemp concretes Variation with formulation, density and water content 2014.
- [GOL 2013] Patrick Glouannec. Thomas Pierre · Thibaut Colinart · Measurement of Thermal Properties of Biosourced Building Materials.
- [LEL 2015] Lelievre. D Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés 2015.
- [MAA 2013] C.Maalouf.D. Tran Le S.B.Umurigirwa M.Lachia O.Douzane :Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete buildingenvelope under summer conditions in France 2013.
- [TRA 2013] Trabelsi, A., Belarbi, R., Abahri, K., and Qin, M. (2013). Reply on the comments regarding the paper "Assessment of temperature gradient effects on moisture transfer through thermogradient coefficient." *Build. Simul.* 6, 109–110.
- [YAT 2002] YATES, T. : Final Report on the Construction of hemp houses at Haverhill, Suffolk ,Client report number :209-717 Rev.1, pp. 48, 13 th August 2002.