

**Titre du sujet :**

Influence des propriétés microstructurales sur les performances hygrothermiques des parois multicouches en bétons biosourcés (chanvre/pulpe de betterave): approche multi-échelle expérimentale et numérique

Unité de recherche UPJV : Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI - UR 3899)

Unité de recherche UL : Scientific Research Center in Engineering (CRSI)

Encadrant UPJV :

- Anh Dung TRAN LE (MCF, HDR)

Encadrant Université Libanaise :

- Elias KINAB (Professeur)

Résumé de la thèse :

Face à l'urgence climatique et environnementale, la transition vers des pratiques de construction durable est devenue une priorité. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), le secteur du bâtiment est responsable d'environ 34 % de la consommation énergétique mondiale et de 37 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie et aux matériaux de construction, positionnant ce secteur comme un levier clé des stratégies de décarbonation.

Dans ce contexte, les matériaux biosourcés apparaissent comme des alternatives crédibles aux matériaux conventionnels, en raison de leur faible impact environnemental et de leurs propriétés hygrothermiques favorables. Les bétons biosourcés, élaborés à partir d'agro-ressources telles que le chanvre, le colza ou la betterave, se distinguent par leur capacité à réguler l'humidité ambiante et à piéger les polluants intérieurs tels que les composés organiques volatils (COV), améliorant ainsi le confort hygrothermique et la qualité de l'air intérieur.

Cependant, la littérature existante reste largement centrée sur des matériaux étudiés isolément, sans intégrer la complexité des systèmes multicouches couramment utilisés dans le bâtiment, où plusieurs matériaux interagissent, notamment à travers les enduits de finition. Ces interactions peuvent avoir un impact significatif sur les performances globales de la paroi, en particulier sur la capacité tampon hygrique des bétons biosourcés qui la constituent. De plus, très peu d'études combinent approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelle pour analyser l'influence des propriétés microstructurales sur les performances hygrothermiques, particulièrement à l'échelle réelle de parois multicouches.

Cette thèse vise à combler ce manque en proposant une étude numérique et expérimentale approfondie de l'influence des caractéristiques microstructurales sur les performances hygrothermiques de parois intégrant des bétons biosourcés à base de chanvre et de pulpe de betterave, avec prise en compte de l'effet des enduits de finition. Le choix du chanvre et de la betterave

est motivé par leur disponibilité à la fois en France qu'au Liban, permettant ainsi une analyse comparative dans deux climats distincts.

Afin d'atteindre ces objectifs, une approche méthodologique combinant la caractérisation expérimentale et la modélisation numérique multi-échelle sera mise en œuvre. L'objectif de ce travail doctoral visera à approfondir la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité à différentes échelles : de la microstructure du matériau, en s'appuyant notamment sur la tomographie aux rayons X, jusqu'à l'échelle de la paroi et du bâtiment. Cette approche permettra d'identifier les paramètres microstructuraux clés, en vue de développer de nouveaux modèles numériques prédictifs, permettant de proposer des configurations de parois optimisées. Ce travail s'inscrit dans une démarche de construction durable, avec une attention particulière portée aux contextes climatiques de la France et du Liban.

Modalités du partenariat et retombées attendues

La thèse s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle entre le Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI, Université de Picardie Jules Verne) en France et le Centre de Recherche en Science et Ingénierie (CRSI, Université Libanaise) au Liban. Durant ses séjours en France, l'étudiant(e) intégrera l'équipe EMAS du LTI. Ce partenariat offrira à l'étudiant(e) la possibilité de mener ses travaux de recherche au sein des deux laboratoires, avec des périodes alternées de six mois dans chaque pays. Chaque institution apportera son expertise et ses ressources spécifiques, favorisant ainsi une approche à la fois théorique et pratique. La direction de la thèse sera assurée conjointement par Anh Dung TRAN LE (MCF, HDR) du LTI, UPJV et Elias KINAB (Professeur) du CRSI, UL, garantissant une supervision scientifique équilibrée. Un suivi régulier des progrès sera effectué par le biais de réunions hebdomadaires avec chaque directeur de thèse, et de réunions mensuelles réunissant l'ensemble de l'équipe de thèse.

Cette thèse favorisera le développement de nouvelles collaborations entre les deux partenaires, contribuant à l'échange de connaissances et de savoir-faire dans le domaine de la construction durable et des matériaux biosourcés. Cette collaboration permettra de mettre en place des projets de recherche communs et renforcera la mobilité académique entre les chercheurs des deux institutions.

Approche méthodologique

L'approche adoptée dans cette thèse repose sur une démarche combinant des études expérimentales et numériques, structurée en cinq Work Packages (WP):

WP1. Revue bibliographique

Tâche 1.1 : Une revue bibliographique approfondie portant sur la construction durable, les matériaux biosourcés, les phénomènes et modèles numériques de transfert de chaleur et de masse, les méthodes de mesure, ainsi que les modes constructifs, sera réalisée afin de poser les bases solides de ce travail de thèse.

Tâche 1.2 : Rédaction d'un article de revue ainsi que du premier chapitre de la thèse.

WP2. Élaboration et formulation des matériaux retenus

Tâche 2.1 : Choix de la formulation des matériaux étudiés (béton de chanvre, béton de betterave et enduits adaptés), basé sur les résultats de la revue bibliographique. Une optimisation de la formulation pourra être envisagée si nécessaire.

Tâche 2.2 : Fabrication des matériaux et des échantillons nécessaires pour les tests de propriétés hygrothermiques.

Tâche 2.3 : Rédaction du chapitre 2, partie 1 de la thèse.

WP3. Caractérisation des propriétés des matériaux à l'échelle microscopique et macroscopique

Tâche 3.1 : Analyse des propriétés microstructurales des matériaux étudiés (porosité, structure des pores, tortuosité...) à l'aide de la micro-tomographie aux rayons X.

Tâche 3.2 : Essais en laboratoire pour mesurer les propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur massique) et hygriques (isotherme de sorption, perméabilité à la vapeur d'eau, et aussi la vapeur de la capacité tampon hygrique MBV).

Tâche 3.3 : Analyse de la relation entre la microstructure et les propriétés des matériaux étudiés.

Tâche 3.4 : Rédaction d'un article ainsi que du chapitre 3, partie 2 de la thèse.

WP4. Étude expérimentale du comportement hygrothermique des parois

Tâche 4.1 : Construction de deux parois (en béton de chanvre et betterave) sans enduit et suivi expérimental de leur comportement hygrothermique sous différentes conditions climatiques de température (T) et d'humidité relative (HR).

Tâche 4.2 : Application de l'enduit sur les parois et suivi expérimental de leur comportement hygrothermique sous différentes conditions climatiques de température (T) et d'humidité relative (HR).

Tâche 4.3 : Analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus.

Tâche 4.4 : Rédaction des articles scientifiques et du chapitre 4 de la thèse.

WP5. Étude numérique, validation et optimisation

Tâche 5.1 : Développement de modèles numériques couplés de transfert de chaleur et d'humidité dans la paroi, prenant en compte de l'influence de la température et de l'hystérésis sur la courbe de sorption (utilisation de logiciels tels que WUFI+, SPARK, Energyplus).

Tâche 5.2 : Validation du modèle pour la paroi simple couche et analyse de la relation entre la microstructure des matériaux étudiés et le comportement hygrothermique de la paroi.

Tâche 5.3 : Validation du modèle pour la paroi multicouche et analyse de l'impact de l'enduit sur la performance hygrothermique de la paroi.

Tâche 5.4 : Optimisation de la performance hygrothermique des parois multicouches exposées à différentes conditions climatiques en France et au Liban.

Tâche 5.5 : Recommandations et justification des conditions d'utilisation des matériaux dans la construction (mode constructif, type de climat, etc.).

Tâche 5.6 : Rédaction des articles scientifiques et du chapitre 5, ainsi que finalisation de la thèse en vue de la soutenance en France (au laboratoire LTI, UPJV).

Planning prévisionnel

La thèse en cotutelle, d'une durée totale de trois ans, sera réalisée selon un modèle de mobilité alternée, avec des périodes de six mois à l'LTI, UPJV (France) et six mois au CRSI, UL (Liban), permettant

ainsi une immersion complète dans les deux environnements de recherche. Le planning détaillé de cette thèse en cotutelle est prévu comme suit :

		Pays	WP and tâche
Année 1	Mois 1-6	Liban	WP1 (T1.1 et T1.2) WP2 (T2.1, T2.2)
	Mois 7-12	France	WP2 (T2.1, T2.2 et T2.3) WP3 (T3.1 et T3.2) WP4 (T4.1)
Année 2	Mois 1-6	Liban	WP3 (T3.3 et T3.4) WP4 (T4.3)
	Mois 7-12	France	WP4 (T4.2, T4.3 et T4.4)
Année 3	Mois 1-6	Liban	WP5 (T5.1, T5.2 et T5.3)
	Mois 7-12	France	WP5 (T5.4, T5.5 et T5.6)

Résultats attendus :

- Élaboration d'un modèle établissant la relation entre la microstructure des matériaux étudiés et leurs propriétés hygrothermiques.
- Acquisition d'une connaissance approfondie de l'impact de la microstructure, des propriétés des matériaux étudiés et de l'enduit sur la performance hygrothermique de la paroi.
- Création d'une base de données expérimentales pour le développement et l'optimisation des modèles de transfert couplé de chaleur et de masse dédiés aux matériaux biosourcés.
- Développement et validation d'un modèle numérique de transfert couplé de chaleur et de masse pour les parois multicouches intégrant des matériaux biosourcés.
- Élaboration d'un guide d'optimisation des parois multicouches en fonction des différentes conditions climatiques.
- Rédaction d'articles pour des conférences (3) et de publications dans des revues scientifiques de rang A (3).
- Rédaction du rapport final de thèse.

Mots clés :

Matériaux de construction bio-sourcés, comportement hygrothermique, paroi multicouche, béton de chanvre, béton de betterave, propriétés hygrothermiques, microstructure, nano-tomographie, étude expérimentale, modélisation

Profil Scientifique du candidat :

Le (la) candidat(e) devra être titulaire (ou en cours d'obtention) d'un Master 2 et/ou d'un diplôme d'ingénieur en génie civil ou science des matériaux. Il ou elle devra également avoir l'esprit d'équipe, des capacités d'analyse et de synthèse, ainsi qu'une motivation pour le travail dans le cadre d'un projet de recherche. Des connaissances en matériaux de construction, un goût pour les études expérimentales et numériques, des aptitudes à la rédaction d'article et de rapports scientifiques sont exigés. Une première expérience sur la caractérisation des matériaux poreux ou biosourcés serait très bien appréciée.

Bibliographie

A.D. Tran Le, C. Maalouf, O. Douzane, G. Promis, T.H. Mai, T. Langlet. Impact of combined the moisture buffering capacity of a hemp concrete building envelope and interior objects on the hygrothermal comfort in a building. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(6): 589-605, 2016.

A.D. Tran Le, JS. Zhang, Z. Liu, D Samri, T. Langlet. Modeling the similarity and the potential of toluene and moisture buffering capacities of hemp concrete on IAQ and thermal comfort. *Building and Environment*, 107455, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107455>.

A.D. Tran Le, S. T. Nguyen, T. Langlet. A novel anisotropic analytical model for effective thermal conductivity tensor of dry lime-hemp concrete with preferred spatial distributions. *Energy and Buildings*, 182: 75-87, 2019.

D. M. Nguyen, J. Zhang, M. Rahim, D. Q. Hoang, G. Promis, M. E. Ganaoui, **A.D. Tran Le**. A review of microstructure and understanding liquid transport in bio-sourced materials through image analysis approach. *Transport in Porous Media*, 7:1643-1664, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02088-7>.

Elias Harb, Chadi Maalouf, Christophe Bliard, **Elias Kinab**, Mohammed Lachi, Guillaume Polidori, Hygrothermal performance of multilayer wall assemblies incorporating starch/beet pulp in France, *Construction and Building Materials*, Volume 445, 2024, 137773, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137773>

Y Wardeh, P Rahme, G Escadeillas, **E Kinab**, S Ginestet, Thermophysical experimental characterisation of concrete cool pavements, *International Journal of Pavement Engineering* 25 (1), 2438851, 2024.

Georges Costantine, Elias Harb, Christophe Bliard, Chadi Maalouf, **Elias Kinab**, Boussad Abbès, Fabien Beaumont, Guillaume Polidori, Experimental characterization of starch/beet-pulp bricks for building applications: Drying kinetics and mechanical behavior, *Construction and Building Materials*, Volume 264, 2020, 120270, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120270>.

G Costantine, C Maalouf, T Moussa, **E Kinab**, G Polidori, Hygrothermal evaluation of hemp concrete at wall and room scales: Impact of hysteresis and temperature dependency of sorption curves, *Journal of Building Physics* 44 (3), 183-224, 2020

G Costantine, C Maalouf, **E Kinab**, G Polidori, Numerical investigation of the hygrothermal behaviour of a hemp-concrete room: hysteresis effect of the sorption isotherm and its temperature dependency, *Building Simulation* 2017 15, 2735-2744

G. Philippe, T. Lecompte, A. Hellouin De Ménibus, H. Lenormand, S. Arufe, C. Chateau, V. Fierro, et A. Celzard. 2021. « Densities of Hemp Shiv for Building: From Multiscale Characterisation to Application ». *Industrial Crops and Products* 164 (juin): 113390. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113390>.

M. Rahim, O. Douzane, **A.D. Tran Le**, G. Promis, T. Langlet. Experimental investigation of hygrothermal behavior of two bio-based building envelope. *Energy and Buildings*, 139: 608-615, 2017.

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. 2022. « Construction et performances environnementale du bâtiment ». Accessed on 23 February 2024. <https://www.scribbr.fr/citation-des-sources/exemples-citations-chicago/>

R. Walker, S. Pavia, et R. Mitchell. 2014. « Mechanical Properties and Durability of Hemp-Lime Concretes ». *Construction and Building Materials* 61 (juin):340-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.

V. Hannu, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen, et K. Lähdesmäki. 2010. « Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures ». *Journal of Building Physics* 33 (3): 201-24. <https://doi.org/10.1177/1744259109343511>.

V. Marie, F. Collet, et C. Lanos. 2018. « Chemical and Multi-Physical Characterization of Agro-Resources' by-Product as a Possible Raw Building Material ». *Industrial Crops and Products* 120 (septembre):214-37. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.