

DESCRIPTIF DU PROJET DE STAGE

Sujet proposé	Nano-tomographie 3D à rayons-X appliquée au comportement hygrothermique des matériaux de bétons biosourcés : caractérisation et prédiction du comportement thermique
Encadrement (Encadrant de stage, co-encadrant...)	Encadrant de stage (LGPM) : Pr. Patrick PERRE Co-encadrant (LGPM) : Dang Mao NGUYEN Co-encadrant (LTI) : Lorena FREITAS DUTRA
Laboratoire(s) d'accueil	Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (LGPM), CentraleSupélec- Université Paris-Saclay. Laboratoire des technologies innovantes (LTI) – UPJV.
Cofinanceur(s)	Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec, Centralesupélec
Résumé	<p>La performance thermique des matériaux bioressources dépend de l'efficacité thermique des matériaux ; elle est évaluée par conductivité thermique (notée k), mais aussi la capacité de sorption et la faculté de diffusion d'humidité pour les matériaux biosourcés, siuvent hygroscopique. Une caractérisation multiphysique est donc nécessaires, même si cette première partie du projet s'intéresse essentiellement à la conductivité thermique. De nombreux facteurs peuvent influencer la conductivité thermique des matériaux : densité, teneur en humidité, morphologie des phases, température...</p> <p>Ce projet a pour ambition de mieux cerner les relations structure-propriétés à la fois sur les propriétés hydriques et thermiques. Son objectif ultime est de guider l'innovation afin de proposer, par la suite, les meilleurs compromis entre résistance mécanique, échanges thermiques et hydriques et pérennité.</p> <p>La démarche s'appuiera sur des matériaux modèles manufacturés en interne, des bétons végétaux avec des fibres naturelles de colza. Les proportions particules-liant et la taille des particules seront ajustable pour obtenir les différentes porosités.</p> <p>Une investigation expérimentale du comportement hydrique et du comportement thermique sera effectuée avec la finalité de comprendre leur lien avec la microstructure des matériaux. Cela se fera par des mesures classiques de laboratoire et par observation 3D par nano-tomographie X et analyse d'image 3D</p> <p>L'imagerie 3D permettra de caractériser la structure des matériaux (morphologie des constituants). Cette base expérimentale permettra de tester des outils de prédiction par changement d'échelle.</p> <p>En effet, la meilleure connaissance des relations structure-propriétés permettra d'imaginer des matériaux spécialisés (barrière hydrique, isolation thermique, structurel), puis des matériaux non-uniformes afin de combiner plusieurs fonctions incompatibles dans le même produit.</p>



Mots clés	Bétons biosources, performances structurelles, couplage entre hydriques et mécaniques, ruine des matériaux.
------------------	---

1 Contexte et enjeux scientifiques

Le domaine du bâtiment est de loin le premier poste de consommation d'énergie en France avec 45% de l'énergie consommée pour les bâtiments résidentiels et tertiaires. Afin d'assurer une meilleure performance énergétique du bâti, des objectifs ont été fixés : -50% de consommations énergétiques (à l'horizon 2050, par rapport aux consommations de 2012), constructions neuves au niveau BEPOS (Bâtiment à Énergie POSitive) en 2020 et 500 000 rénovations lourdes de logements par an dès 2017.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), qui visait à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 1990 et 2050 est en cours de révision pour s'adapter à ce nouvel objectif. L'analyse sectorielle montre que les principaux secteurs émetteurs de GES sont l'agriculture, qui reste difficile à décarboner, l'industrie, qui doit évoluer vers encore plus d'efficacité, le secteur des transports, qui contribue majoritairement avec 40% des émissions et finalement le secteur du bâtiment qui est très en retard par rapport aux ambitions affichées en matière de rénovation. En 2016, le secteur du bâtiment représentait 26% des émissions nationales soit environ 115 MtCO₂eq. Par ailleurs, la construction neuve (résidentielle et tertiaire) équivaut à environ 30 MtCO₂eq. Autrement dit, le secteur global représente environ 30% des émissions annuelles nationales.

La SNBC préconise donc le développement de filières locales visant la production et la mise en œuvre de matériaux de construction et de rénovation à faible impact carbone, notamment par l'introduction de matériaux biosourcés. L'utilisation de matériaux biosourcés a un grand intérêt et contribue significativement, non seulement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles, mais également aux bonnes performances hygrothermiques de l'enveloppe des bâtiments. Par conséquent, le confort intérieur ressenti par les occupants est amélioré et la consommation énergétique globale est diminuée en raison de la diminution du besoin en chauffage (ou de climatisation).

La compréhension du comportement hygrothermique est donc cruciale pour l'optimisation des propriétés multi-physique des matériaux biosourcés. Plus précisément, la compréhension des relations entre la structure du matériau (morphologie + propriétés des phases) et le comportement macroscopique est la clé permettant de décliner les connaissances en stratégie de conception (matériaux ou assemblage) afin de proposer des solutions performantes. Cette capacité d'action est nécessaire pour conférer plus d'avantages compétitifs aux matériaux biosourcés et augmenter ainsi leur taux de pénétration sur le marché des matériaux de construction.

Par ailleurs, l'un des principaux freins à une plus large utilisation réside dans l'absence de textes réglementant leur mise en œuvre et leurs performances. La rédaction de Document Technique Unifié, de règles professionnelles généralisées à l'introduction de granulats végétaux (de différentes natures) dans les bétons ou encore d'Avis Technique (Atec) ou d'Appréciation Technique d'expérimentation (ATex) permettrait aux donneurs d'ordres de prescrire l'emploi de ces matériaux dans l'acte de bâtir de demain. Pour arriver à ces fins, il est indispensable de comprendre des relations structure/propriétés, par exemple via la taille et la distribution de taille



des particules. Ce projet a donc un fort potentiel de retombées sur la promotion des matériaux biosourcés dans le bâtiment, mais probablement aussi dans d'autres secteurs d'activités.

2 Description du travail de stage

2.1 Objectifs scientifiques/problématique de recherche

L'excès d'humidité, que ce soit sous la forme d'eau liquide ou d'eau liée, affecte considérablement les performances des bâtiments, causant de nombreux problèmes, tels que la faible durabilité des matériaux, les fissures ou déformations dues au retrait/gonflement, la perte de propriétés d'isolation, le développement des moisissures, l'inconfort, les allergies et les maladies respiratoires.

En réponse à ces préoccupations, une recherche sur la fabrication et l'optimisation de matériaux biosourcés pour répondre aux impératifs de performance hygrothermique et énergétique des bâtiments est proposée. Par ailleurs, la mesure, même sophistiquée, de ces propriétés, ne permet que partiellement de proposer des actions susceptibles de promouvoir ces matériaux. Certes la qualification précise des propriétés permet une utilisation optimisée des matériaux existants, mais ne permet pas de répondre à de nouvelles spécifications, notamment à la demande de concilier des propriétés a priori incompatibles : barrière hydrique, régulation hydrique, isolation thermique, propriétés structurelles.

Dans le cadre de ce projet, la chaîne complète de compréhension des relations structure-propriétés sera appliquée à une seule propriété assez simple à mesurer : la conductivité thermique. La valeur k est utilisée conjointement aux propriétés hydriques pour comparer les performances thermiques et énergétiques de différents matériaux d'isolation des bâtiments. De nombreux facteurs peuvent influencer la conductivité thermique des matériaux. Fondamentalement, la densité, la teneur en humidité et la température ont un effet significatif sur la valeur k des matériaux isolants. Cela ouvre un champ d'innovation : l'obtention de ces propriétés incompatibles par des matériaux spécialisés (optimisés pour l'une des propriétés), la conception d'assemblages capables de respecter un cahier des charges ou des matériaux hétérogènes capables de satisfaire toutes les exigences.

Les bétons à base de biomasse lignocellulosique, notamment le colza, manufacturés à façon, seront utilisés dans ce projet comme matériau modèle. Des matériaux contrastés seront réalisés en gardant les proportions particules-liant ainsi et en variant la taille des particules. Par ailleurs, tous les constituants des matériaux, les briques de base, seront également caractérisés.

Une investigation expérimentale exploratoire du comportement hydrique sera réalisée à travers le test de la valeur tampon d'humidité (MBV) ce qui permet de situer la performance hydrique matériau comparativement à d'autres matériaux de construction. De façon très complémentaire, l'imagerie 3D aidé par l'analyse d'image permet aussi de caractériser la structure des matériaux (morphologie des constituants).

Cette base expérimentale (structure, propriétés des briques de base et comportement des matériaux) permettra de tester des outils de prédiction par changement d'échelle dans le cas de la conductivité thermique.

Les connaissances acquises durant le stage permettront d'étendre la méthode à d'autres propriétés importantes des matériaux de construction pour, *in fine*, guider l'innovation pour ces matériaux de construction biosourcés. En effet, la meilleure compréhension des relations structure-propriétés permettra d'imaginer des matériaux spécialisés (barrière hydrique, isolation thermique, structurel), puis des matériaux non-uniformes afin de combiner plusieurs fonctions incompatibles dans le même produit. La méthodologie développée pourra, ultérieurement, être étendue à d'autres propriétés (massique, mécanique, couplage...) dans un cadre d'une thèse de

doctorat. Ce travail pourrait également servir comme un excellent complément à un modèle numérique d'homogénéisation en 3D développé au sein du laboratoire LGPM.

2.2 Approche / Méthodologie

Le stage sera réalisé en collaboration entre CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (LGPM) et l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV), Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI).

Le stage sera organisé par les tâches suivantes :

1. Fabrication de bétons végétaux avec un type de fibre naturelle et une granulométrie définie. Le mélange massique fibres/liant sera changé afin de produire des échantillons avec différentes propriétés notamment la porosité, donc la conductivité thermique.
2. Analyse morphologique tri-dimensionnelle (morphologie des phases et anatomie des tiges) par nano-tomographie à rayons-X (Figure 1).
3. Mesure de la conductivité et capacité thermique par la méthode fluxmétrique des échantillons produits (Figure 2).
4. Corrélation de la microstructure avec les propriétés thermiques du matériau.

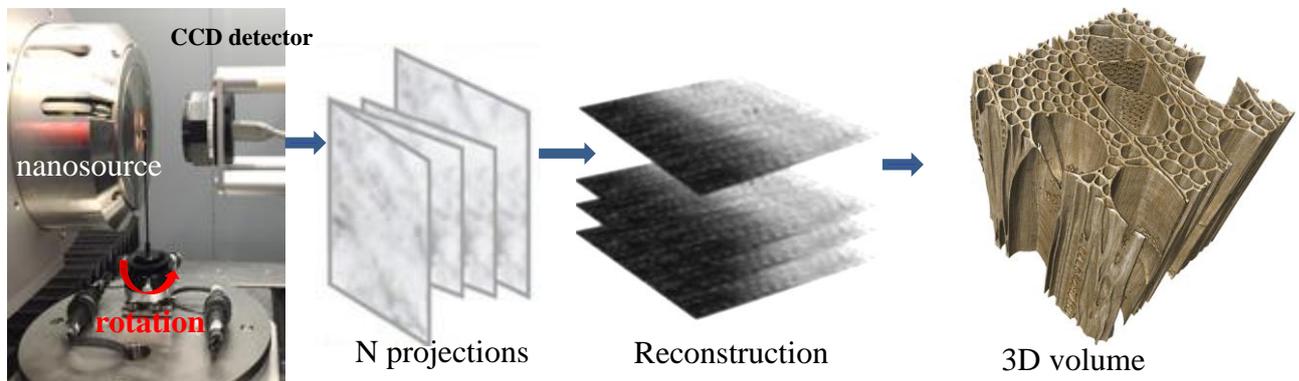


Figure 1 : Illustration schématique de la tomographie pour un volume 3D d'échantillon de bois de peuplier avec une résolution standard de $0,4 \mu\text{m}$ correspondant à un temps d'acquisition d'environ 4h. L'échantillon de peuplier d'environ 1 mm de diamètre a été préparé pour cette expérience.

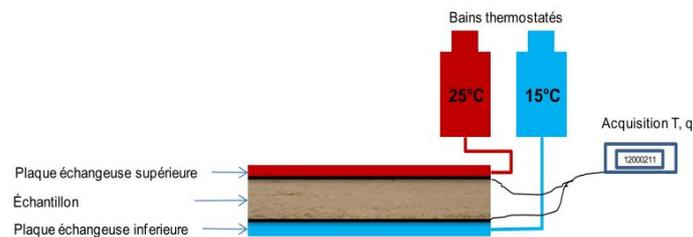
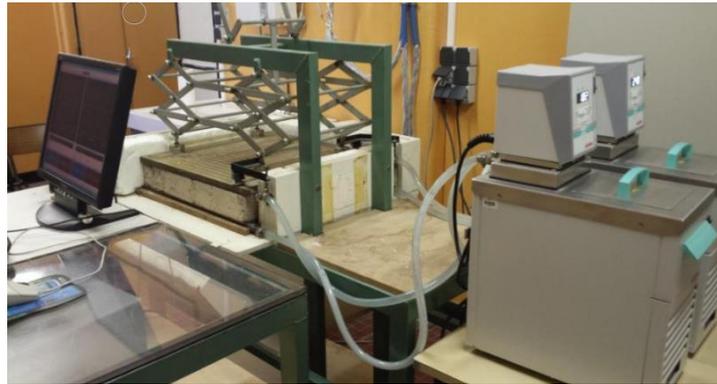


Figure 2 : Dispositif expérimental de mesure de la chaleur spécifique par la méthode fluxométrique.

2.3 Programme / échéancier prévisionnel

Le programme de stage sera réparti de manière équilibrée entre la Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec, LGPM et LTI avec une alternance de la présence du stagiaire au sein de ces deux structures. Une vue en mind mapping montre l'organisation du programme de travail ainsi que les différentes étapes du projet (Figure 3).

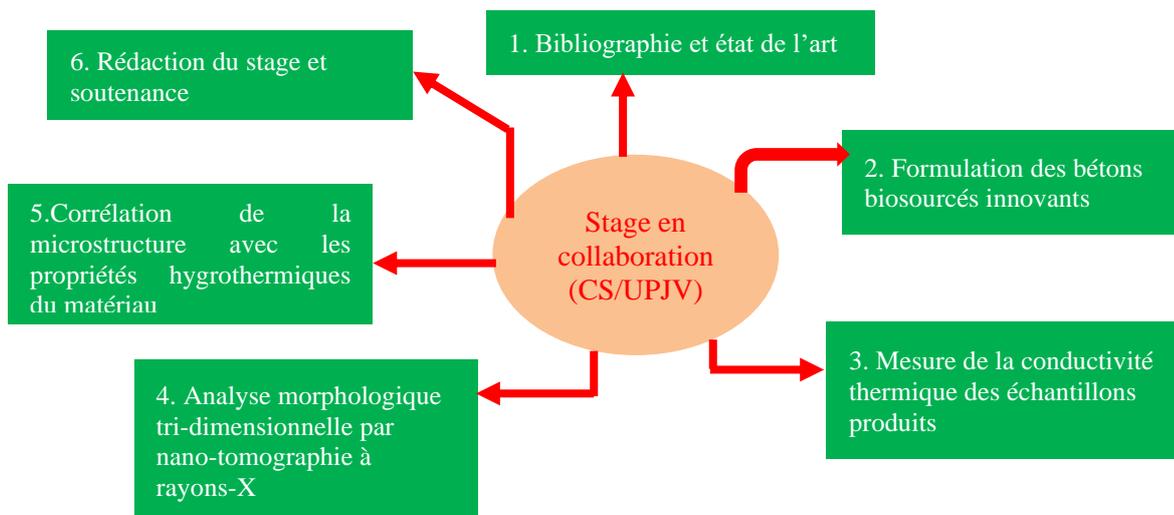


Figure 3 : Mind mapping du projet de stage.

2.4 Moyens mis à disposition par le laboratoire d'accueil

Le laboratoire des technologies innovantes (LTI) possède un savoir-faire reconnu en termes de fabrication et de caractérisation de nouveaux matériaux éco-responsables pour le domaine du Bâtiment (approches mésoscopique et macroscopique). En plus de la fabrication, le laboratoire dispose de nombreuses méthodes de caractérisation des matériaux de construction aux échelles mésoscopique et macroscopique, à savoir : des caissons climatiques permettant de réguler le couple température et humidité relative pour solliciter une paroi à l'échelle réelle, des dispositifs de mesures thermiques à l'aide de la méthode de la plaque chaude gardée et de méthodes fluxmétriques, des dispositifs de mesures hydriques à l'aide d'enceintes climatiques hygromorélogées.

Ces dispositifs sont complétés à souhait par le laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux (LGPM), notamment sur sa Chaire de Biotechnologie de Centralesupélec installée au CEBB à Pomacle. Cette équipe dispose en effet d'équipements nécessaires à la caractérisation des matériaux aux échelles méso et microscopique, comme un nano-tomographe à rayons-X de dernière génération et un analyseur de sorption dynamique de vapeur d'eau (DVS), un système de essais mécanique *in-situ*, et un dispositif de génération et de contrôle d'humidité. Ce laboratoire a aussi une grande expertise en modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse : modélisation macroscopique, modélisation multiéchelle et changement d'échelle.

2.5 Collaborations envisagées

Ce projet permettra de développer une nouvelle collaboration entre le Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, CentraleSupélec, Paris-Saclay et le Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne, Amiens sur les matériaux agro-sourcés. L'objectif général est de tirer le meilleur bénéfice de la complémentarité des ressources disponibles, d'optimiser les coûts de production et énergétiques, et de développer des applications pratiques et industrielles pour des matériaux biosourcés.

En ayant une base de collaboration grâce à ce financement par GDR (1500 euros), la Chaire de Biotechnologie de Centralesupélec (LGPM) complètera le reste pour ce stage. La prochaine étape serait un dépôt de projet auprès d'un organisme national de recherche tel que l'Agence Nationale de Recherche.

A l'issue, ou durant le projet, des partenariats industriels pourront être envisagés pour transférer les connaissances scientifiques acquises. L'implication du LGPM dans le projet Smart-Réno est en ce sens une opportunité car il nous ouvre les portes d'un réseau regroupant les principaux acteurs français sur les matériaux de construction biosourcés.

2.6 Bibliographie sélective (travaux cités + quelques références des équipes d'encadrement)

Aroush DR-B, Maire E, Gauthier C, Youssef S, Cloetens P, Wagner H. A study of fracture of unidirectional composites using in situ high-resolution synchrotron Xray microtomography. *Composites Science and Technology* 66:1348 –53, 2006.



Baranowski T, Dobrovolskij D, Dremel K, Hölzing A, Lohfink G, Schladitz K, et al. Local fiber orientation from X-ray region-of-interest computed tomography of large fiber reinforced composite components. *Composites Science and Technology* 183:107786, 2019.

Bonnet M. Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne : University of Paris-Est, 2017

Bulcke JV, Boone M, Acker JV, Stevens M, Hoorebeke LV. X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. *Annals of Forest Science* 66:508, 2009.

Freitas Dutra L., N. Mendes, P. C. Philippi. On the characterization of pore size distribution of building materials, *Journal of Building Physics* 41, 247-263, 2017.

Freitas Dutra L., M.E. Freitas, A.C. Grillet, N. Mendes and M. Woloszyn. Microstructural characterization of porous clay-based ceramic composites. *Materials* 12(6):946, 2019.

Ketcham RA, Carlson WD. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Computers and Geosciences* 27:381-400, 2001.

Louërat M., Ayouz M., Perré P., Heat and moisture diffusion in spruce and wood panels computed from 3-D morphologies using the Lattice Boltzmann method. *Journal Thermal Science* 130: 471-483, 2018.

Maire E, Buffière J-Y, Salvo L, Blandin JJ, Ludwig W, Létang JM. On the application of X-ray microtomography in the field of materials science. *Advanced Engineering Materials* 3:539-46, 2001.

Nguyen D.M., A.C. Grillet, Q.B. Bui, T.M.H. Diep, M. Woloszyn. Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders. *Construction and Building Materials* 186, 686-698, 2018.

Nguyen D.M., A.C. Grillet, T.M.H. Diep, Q.B. Bui, M. Woloszyn. Influence of thermo-pressing conditions on insulation materials from bamboo fibers and proteins-based bone adhesion. *Industrial Crops and Products* 111, 834-845, 2018

Perré P., I. Turner. A 3-D version of *TransPore*: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of heat and mass transfer* 42: 4501-4521, 1999.

Perré P.. Coupled heat and mass transfer in biosourced porous media without local equilibrium: a macroscopic formulation tailored to computational simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140: 717-730, 2019.

Perré P., Challansonnex A., Colin J., On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 133: 968-975, 2019.

Promis G., L. Freitas Dutra, O. Douzane, A.D. Tran Le, T. Langlet. Temperature-dependent sorption models for mass transfer throughout bio-based building materials. *Construction and Building Materials* 197, 513-525, 2019.

Sedighi-Gilani M, Vontobel P, Lehmann E, Carmeliet J, Derome D. Liquid uptake in Scots pine sapwood and hardwood visualized and quantified by neutron radiography. *Materials and Structures* 47:1083–96, 2014.