

Construire durablement devient un enjeu stratégique face aux défis climatiques et énergétiques actuels. Les matériaux bio et géosourcés constituent des alternatives intéressantes car ils peuvent contribuer à la fois au confort intérieur et à l'efficacité du bâti. Disponibles localement, ils peuvent permettre l'émergence d'économies locales et vertueuses, respectueuses de l'environnement. Cependant, les matières premières utilisées (terre crue, paille, bois, ...) et certaines techniques de construction (pisé, bauge, torchis, ...) sont connues depuis des siècles mais sont encore peu étudiées dans la littérature.

Pourtant, la terre crue est un matériau de construction exemplaire sur bien des aspects : disponibilité, recyclabilité, faible impact environnemental, performances mécaniques et hydriques reconnues. L'incorporation de granulats végétaux à une matrice argileuse (terre allégée) permet d'atteindre de bonnes performances thermiques, grâce à une importante porosité multi-échelle. En effet, l'espace poral qui sert à la circulation de nutriments pendant la phase de croissance, se remplit d'air lorsque la plante n'est plus en terre. Ceci explique les capacités isolantes remarquables des co-produits agricoles. Cependant leur diversité, ajoutée à celle des sols utilisés en tant que matrice liante, conduit à des performances très variables selon les formulations et la nature des constituants. Le même constat peut être fait lorsque les granulats végétaux sont incorporés dans une matrice minérale (chaux, métakaolin, ...). On parle alors de bétons végétaux, utilisés en isolation répartie et principalement mis en œuvre en remplissage d'une structure porteuse en bois. Malgré des performances hygrothermiques intéressantes, la pluralité des formulations et le manque de recul sur le comportement de ces éco-matériaux freinent significativement leur utilisation à grande échelle. Bien que le béton de chanvre soit le plus étudié ces dernières années, il apparaît que d'autres co-produits agricoles que la chènevotte sont exploitables et plus largement disponibles selon le territoire considéré.

Dans ce contexte, ces travaux de recherche visent à proposer des méthodes de prédiction du comportement thermique de granulats en vrac, de bétons végétaux ou de terres allégées selon trois axes de travail :

- Compréhension des phénomènes physico-chimiques complexes qui s'opèrent selon les sollicitations extérieures (variations de température et d'humidité relative de l'air ambiant).
- Modélisation du comportement thermique des matériaux en considérant la variabilité de la ressource.
- Méthodologie d'optimisation de la formulation selon l'usage.

Afin de pouvoir considérer la nature spécifique et la complexité -tant sur le plan microstructural qu'à l'échelle macroscopique- des matériaux étudiés, un travail interdisciplinaire s'impose. Ainsi, la méthodologie développée dans cette thèse s'appuie notamment sur les domaines des sciences physiques et de la chimie en plus de celui du génie civil. Elle utilise des outils d'homogénéisation analytiques par champs moyens et des méthodes inverses communément utilisés dans d'autres disciplines scientifiques. Des modèles de prédiction de la conductivité thermique sont développés à partir des phénomènes physico-chimiques qui se produisent sous les contraintes d'usage (température et humidité relative). Une attention particulière est portée sur la cohérence de ces modèles vis-à-vis de la réelle morphologie des matériaux étudiés. Par ailleurs, la prise en compte de la variabilité de la ressource est un point fondamental pour contribuer au développement de ces éco-matériaux, dont l'utilisation est favorisée par l'entrée en vigueur d'une nouvelle Réglementation Énergétique (RE 2020) depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2022 en France. Ainsi, ces travaux s'articulent à chaque échelle du matériau pour tenter de lever différents verrous identifiés dans la littérature.

D'abord, l'échelle moléculaire est explorée. On note que granulat végétal est considéré dans la littérature comme un granulat inerte. Or, son origine biologique lui confère des affinités particulières avec l'eau. Ce caractère hydrophile mène à une réflexion argumentée afin de proposer une nouvelle explication au phénomène d'hystérésis basé sur un couplage hydro-mécanique à l'échelle moléculaire. Cette

compréhension des mécanismes de fixation de l'eau dans l'espace poral des particules végétales est fondamentale pour une prise en compte pertinente à l'échelle particulaire, sous sollicitation hydrique.

Ensuite, l'étude de l'échelle particulaire s'avère stratégique. La littérature souligne la diversité des propriétés d'une chènevotte à l'autre notamment, due à des conditions météorologiques, des lieux, des méthodes ou encore des périodes de récolte différentes. A la recherche d'un point commun pour contourner la difficulté liée à la variabilité, les microstructures de différents co-produits agricoles sont analysées. On note que la composition chimique du squelette solide est très semblable pour tous les granulats lignocellulosiques, principalement constitués de cellulose. La variabilité intrinsèque des granulats est ainsi corrélée à leur porosité intra-particulaire, donnée accessible expérimentalement grâce à des travaux récents. En considérant la réelle morphologie de chaque type de particule végétale, des processus d'homogénéisation successifs donnent accès à la conductivité thermique particulaire selon les sollicitations extérieures (température et humidité relative).

Grâce à la connaissance des propriétés thermiques à l'échelle particulaire, une dernière étape d'homogénéisation permet d'accéder à l'échelle matériau. Pour valider les modèles prédictifs développés, une campagne expérimentale est menée sur des panneaux isolants à base de moelle de tournesol. Un très bon accord entre valeurs expérimentales et valeurs modélisées permet d'asseoir la pertinence des méthodes utilisées. Par ailleurs, dans le cadre de ces travaux expérimentaux, une technique de mise en œuvre innovante est mise au point. En effet, pour minimiser leur impact environnemental, les panneaux isolants sont fabriqués sans aucun liant ni procédé énergivore.

Enfin, à partir des résultats obtenus aux différentes échelles, la variabilité de la conductivité thermique d'un béton végétal ou d'une terre allégée peut être anticipée avant même l'étape de fabrication et sur toute la gamme d'usage. L'optimisation de la formulation devient une réalité et différentes pistes sont explorées en ce sens (changement de liant, de granulats, orientation des granulats...). En complément, l'amorce d'une analyse multicritère est proposée pour une réflexion et une optimisation plus globale sur ces matériaux, au-delà de l'aspect thermique.

Ces travaux de thèse proposent des méthodes inédites de prédiction du comportement thermique des matériaux bio et géosourcés, s'appuyant sur la réelle morphologie de composites incorporant des co-produits agricoles. Ils ouvrent la voie vers une utilisation massive des granulats végétaux dans les matériaux de construction bio et géosourcés. L'approche multi-échelle et multi-physique menée démontre l'intérêt d'un travail collaboratif et interdisciplinaire afin de mieux appréhender le comportement complexe de ces éco-matériaux. L'accessibilité des données d'entrée de la modélisation est un point fondamental. Elle permet une applicabilité rapide de cette contribution, au plus près des besoins des acteurs d'une économie locale de la construction. Elle répond également à l'urgence climatique et environnementale à laquelle nos sociétés sont confrontées. Dans le contexte actuel, ces travaux peuvent aider de manière significative à la transition écologique du secteur du bâtiment qui se doit d'être à la fois rapide, efficiente et pérenne.

#### Mots-clés

*Matériaux de construction bio-sourcés, Modélisation multi-échelle, Propriétés thermiques, Granulat végétal, Matériaux de construction géo-sourcés, Microstructure.*

**“Thermal performance modeling and optimization of bio- and geo-based materials using a multi-scale approach: contribution to the valorization of a wide range of agricultural co-products”  
-Abstract-**

Sustainable construction is becoming a strategic issue in today's climate and energy challenges. Bio- and geosourced materials are interesting alternatives, as they can contribute to both indoor comfort and building efficiency. They are locally available, enabling the emergence of virtuous local economies that respect the environment. However, the resources used in building materials (raw earth, straw, wood, etc.) and certain construction processes (rammed earth, cob, wattle and daub, etc.) have been known for centuries but remain little studied in the literature.

In many respects, raw earth is an exemplary building material: availability, recyclability, low environmental impact, recognized mechanical and hydric performance. The incorporation of plant aggregates into a clay matrix (lightened earth) ensures good thermal performance, thanks to high multi-scale porosity. In fact, the pore spaces, which circulate nutrients during the growth phase of plants, fill with air when the plant is no longer in the ground. However, the diversity of these by-products, combined with the variability of soils used as binder matrices, leads to highly variable performance depending on the formulations and nature of the constituents. The same observation can be made when plant aggregates are incorporated into a mineral matrix (lime, metakaolin, etc.). Plant-based concretes are used for distributed insulation and are mainly used to fill load-bearing wooden structures. Despite interesting hygrothermal performances, their widespread use is significantly slow down by the wide range of formulations and the lack of feedback concerning the behavior of these eco-materials. Whereas hemp concrete has been the most widely studied material in recent years, it appears that agricultural by-products other than hempcrete can be exploited and may be more widely available, depending on the given region.

In this context, the aim of this research work is to propose methods for predicting thermal behavior of bulk aggregates, plant-based concretes and lightweight earth along three lines:

- Understanding the complex physico-chemical phenomena involved under external stresses (variations in temperature and relative humidity of the ambient air).
- Modeling the thermal behavior of materials taking into account resource variability.
- Methodology for optimizing formulation according to use.

In order to consider the specific nature and complexity - both at microstructural and macroscopic levels - of the materials studied, interdisciplinary work is essential. The methodology developed in this thesis therefore combines the fields of physics and chemistry with that of civil engineering. It uses mean-field analytical homogenization tools and inverse methods commonly used in other scientific disciplines. Thermal conductivity prediction models are developed on the basis of physico-chemical phenomena occurring under usage conditions (temperature and relative humidity). Particular attention is paid to ensuring that models are consistent with the actual morphology of the materials studied.

In addition, taking into account the variability of the resource is a key factor in the development of these eco-materials. Their use is encouraged by the entry into force of new Energy Regulations (RE 2020) on January 1, 2022 in France. Thus, this work is structured around each scale of the material in an attempt to overcome the various obstacles identified in the literature.

First, the molecular scale is explored. The literature considers plant aggregates to be inert. However, its biological origin gives it a particular affinity with water. This hydrophilic character suggests a new explanation for the hysteresis phenomenon, based on hydro-mechanical coupling at the molecular level. Understanding the mechanisms of water binding within the pore space of plant particles is crucial for considering these effects at the particle scale under water sollicitation.

Secondly, the particle scale is of strategic importance. The literature highlights the diversity of properties from one hemp shiv to another, due in particular to different meteorological and geographic conditions, methods and harvesting periods. In search of a common ground to overcome the difficulty of variability, the microstructures of different agricultural co-products are analyzed. The chemical composition of the solid skeleton is very similar for all lignocellulosic aggregates, mainly made up of cellulose. The intrinsic variability of the aggregates is thus correlated to their intra-particle porosity. This

**“Thermal performance modeling and optimization of bio- and geo-based materials using a multi-scale approach: contribution to the valorization of a wide range of agricultural co-products”**

**-Abstract-**

parameter is experimentally accessible thanks to recent work. By considering the actual morphology of each type of plant particle, successive homogenization processes provide access to particle thermal conductivity according to external loadings (temperature and relative humidity).

Knowledge of thermal properties at the particle scale enables a final homogenization step to access the material scale. To validate the developed predictive models, an experimental campaign is carried out on sunflower pith insulating panels. A very good agreement between experimental and modelled values confirms the relevance of the proposed methods. In addition, an innovative implementation technique is developed during the experimental work. To minimize environmental impact, insulating panels are manufactured without binders or energy-consuming processes.

Finally, based on the results obtained at different scales, the variability of the thermal conductivity of a plant-based concrete or lightweight earth can be anticipated even before the manufacturing stage and over the entire range of uses. Formulation optimization is becoming a reality, and various avenues are explored in this direction (change of binder, aggregate, orientation of aggregates, etc.). In addition, a multi-criteria analysis is proposed beyond the thermal aspect for a more global approach to the optimization of these materials.

This thesis proposes new ways of predicting the thermal behavior of bio- and geo-based materials, exploiting the real morphology of composites incorporating agricultural co-products. This work paves the way for the widespread use of plant aggregates in bio- and geo-based building materials.

The multi-scale and multi-physics approach demonstrates the value of collaborative and interdisciplinary work to better understand the complex behavior of these eco-materials. The accessibility of modeling input data is a fundamental point. It enables this contribution to be applied rapidly, as close as possible to the needs of local construction industry players. It also addresses the urgent climatic and environmental issues facing our societies. In the current context, this work can make a significant contribution to the ecological transition of the building sector, which needs to be rapid, efficient and sustainable.

**Keywords**

*Bio-based building materials, Multiscale modeling, Thermal properties, Bio-aggregate, Geo-based building materials, Microstructure.*