

**MÉTHODES INVERSES ET APPROCHES MULTI-FIDÉLITÉ : APPLICATION A L'ÉVALUATION DE  
LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DE PAROIS À BASE DE MATÉRIAUX DURABLES  
BIOSOURCÉS**

**Mots clés** : problèmes inverses, approche Bayésienne, modèles physiques, simulation numérique, matériaux biosourcés, quantification des incertitudes.

**CONTEXTE INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE**

---

En France, le secteur du Bâtiment représente actuellement 44% de la consommation d'énergie et 25% des émissions de CO<sub>2</sub>. Afin de répondre à des exigences de sobriété énergétique et de développement durable, plusieurs ruptures sont ainsi attendues dans ce secteur. L'utilisation plus systématique de matériaux durables, comme les matériaux biosourcés (ex: chanvre) et la terre crue, pour la construction et la rénovation des bâtiments est un exemple caractéristique de ces évolutions attendues. Dans le but d'étudier et d'encourager ces constructions durables, il est primordial de pouvoir en évaluer les performances énergétiques in-situ, avant et après une action d'amélioration par isolation utilisant un matériau biosourcé. La résistance thermique est l'indicateur de performance thermique couramment employé. Elle peut être identifiée par la résolution d'un problème inverse couplant un modèle thermique direct et un ensemble d'observations (mesures physiques). En raison de la complexité des phénomènes thermiques et hydriques à modéliser dans un matériau biosourcé, ce modèle peut être coûteux en temps de calcul et non adapté aux méthodes classiques de propagation d'incertitude (Monte Carlo).

L'objectif de la thèse est de développer une méthodologie de propagation d'incertitudes dans un problème inverse en exploitant des techniques de multi-fidélité pour réduire les coûts de simulation.

**PROBLEMATIQUES DE THESE**

---

On peut lister quatre grandes étapes pour ce projet de thèse.

- (1) Détermination des niveaux de fidélité du modèle direct, caractérisés par un coût de simulation et un niveau de réalisme, chaque niveau pouvant par exemple être considéré comme un élément d'une hiérarchie d'approximations du code haute-fidélité (HF).
- (2) Formulation du problème d'inversion multi-fidèle dans un cadre Bayésien pour l'évaluation d'incertitude sur l'identification de la résistance thermique de paroi. La combinaison des simulations aux différents niveaux de fidélité déterminés à l'étape 1 permettra de réduire les temps de calcul avec un niveau d'incertitude contrôlé.
- (3) Validation numérique du protocole proposé sur cas tests à partir de scénarios simulés.
- (4) Validation physique du protocole proposé à partir d'expérimentations sur parois biosourcées réelles de l'équipement d'excellence Sense-City.

Le (la) futur(e) doctorant(e) commencera par sélectionner un modèle direct HF en collaboration avec les partenaires du projet à partir d'une revue des différents **modèles hygro-thermiques** proposés dans la littérature. Ce modèle conduira au meilleur compromis entre fidélité physique, complexité d'implémentation et performance de résolution. Il servira de base pour la **simulation directe** des

échanges thermiques (transfert et diffusion) dans une paroi biosourcée en supposant connues les conditions limites (températures, humidité) ainsi que les propriétés physiques de la paroi.

Ce modèle HF, coûteux en raison de sa bonne représentation des phénomènes physiques, jouera un rôle capital dans l'estimation des performances énergétiques de la paroi par **méthodes inverses**. Le problème inverse consistera en effet à rechercher le jeu de paramètres du modèle HF le plus susceptible de conduire par exemple aux champs de températures mesurés lors d'une sollicitation thermique donnée sur la paroi.

Dans cette thèse, la problématique de réduction des coûts de calculs est centrale et sera un enjeu clé de la phase d'inversion. L'association de méthodes de réduction par une approche multi-fidélité est une piste envisagée pour réduire les coûts de simulation du modèle HF pour l'inversion. Des techniques de réduction d'ordre comme les méthodes des bases réduites seront étudiées de même que l'utilisation de modèles relevant de l'**apprentissage statistique**.

En se plaçant dans un **cadre Bayésien**, le (la) doctorant(e) s'attachera à intégrer aussi précisément que possible les **erreurs de mesure** affectant les observations, ainsi que les **erreurs de modèle** des différents niveaux de fidélité.

Après une première phase de validation par tests virtuels sur un benchmark numérique, le (la) futur(e) doctorant(e) sera amené(e) à évaluer les performances de sa méthode à partir d'expérimentations sur parois réelles menées en laboratoire, ainsi qu'au sein de l'équipement d'Excellence Sense-City, sous conditions climatiques contrôlées et naturelles.

## INFORMATIONS PRATIQUES

---

**Contacts :** Julien WAEYTENS ([julien.waeytens@univ-eiffel.fr](mailto:julien.waeytens@univ-eiffel.fr)), Guillaume PERRIN ([guillaume.perrin@univ-eiffel.fr](mailto:guillaume.perrin@univ-eiffel.fr)), Rachida CHAKIR ([rachida.chakir@univ-eiffel.fr](mailto:rachida.chakir@univ-eiffel.fr)), Séverine DEMEYER ([severine.demeyer@lne.fr](mailto:severine.demeyer@lne.fr)).

**Organisme d'accueil :** La thèse sera réalisée au sein du laboratoire Instrumentation, Simulation et Informatique Scientifique (LISIS) de l'université Gustave Eiffel (UGE), en collaboration avec le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE). La recherche du LISIS s'inscrit dans une politique nationale de transformation des villes, afin de les rendre plus agréables pour leurs habitants, plus sobres énergétiquement et plus résilientes aux aléas climatiques. Le LISIS est notamment particulièrement actif dans le développement, la conception et le déploiement de capteurs innovants, ainsi que dans l'exploitation de modèles physiques pour le traitement des informations fournies par ces capteurs.

**Financement :** Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) RESBIOBAT, qui regroupe de nombreux spécialistes publics et privés du bâtiment autour de la caractérisation in-situ des performances énergétiques de parois usuelles et durables.

**Date de début espérée :** octobre 2022.

**Compétences requises :** Le (la) candidat(e) devra présenter un intérêt pour la simulation numérique de phénomènes physiques, ainsi que pour l'analyse de données expérimentales. Des compétences dans un ou plusieurs des domaines suivants seront par ailleurs valorisées : équations aux dérivées partielles, programmation (de type Matlab, Python ou R), résolution de problèmes inverses, statistiques/probabilités.