

Sujet de thèse : Mesure de la résistance thermique de parois fortement isolées et de parois bio-sourcées de bâtiment

Thèse réalisée dans le cadre du projet ANR RESBIOBAT

Contexte et objectifs :

Dans le contexte de transition énergétique actuel, des avancées majeures sont attendues dans le secteur du bâtiment en termes de réduction des consommations énergétiques. Les deux tiers du parc de logements en France ont été construits avant l'application de la première réglementation thermique en juin 1975. On estime qu'environ 50% d'entre eux ont fait l'objet de travaux de rénovation relatifs à l'enveloppe (isolation des combles ou des parois essentiellement par l'intérieur, changement de fenêtres, etc.). Le nombre de bâtiments existants imparfaitement isolés en France reste donc à ce jour très important. Le paramètre physique représentant la qualité d'une enveloppe du point de vue de l'isolation thermique est sa résistance thermique. Actuellement, des méthodes de mesure de cette grandeur existent, soit à l'état de mesures de laboratoire ou exploratoires, soit dans le cadre de normes internationales [1-9]. Cependant, chacune de ces méthodes ne remplit pas toutes les conditions garantissant une mesure systématique : utilisation sur tout type de paroi et de bâtiment, à tout moment de l'année, faible durée de mesure, simplicité d'utilisation, coût de revient modéré. La résistance thermique d'une paroi doit de plus pouvoir être mesurée quelle que soit l'utilisation du bâtiment : en vue de sa rénovation, pendant sa construction, à sa livraison ou au cours de son utilisation afin de prévenir tout défaut ou de s'assurer que les performances attendues sont atteintes. Ajoutons enfin que les nouveaux modes de construction "durables", c'est-à-dire à faible impact environnemental, font appel à des matériaux bio-sourcés et locaux tels que le béton de chanvre ou la terre crue. Ce type de matériaux au comportement fortement hygrothermique rend inopérantes un certain nombre de méthodes de mesure existantes de la résistance thermique.

Le sujet de thèse proposé s'inscrit dans le cadre du projet ANR RESBIOBAT (qui fait suite au projet ANR RESBATI) : « *Mesure in-situ de RESistance thermique de parois fortement isolées et de parois BIO-sourcées de BATiment* ». Ce projet de recherche vise à proposer un prototype de mesure combinant modélisation physique et statistique, simulation numérique et mesures pour une meilleure caractérisation in-situ de la résistance thermique de murs conventionnels et biosourcés. Le consortium du projet réunit un laboratoire universitaire (CERTES), deux organismes de recherche publique (Cerema-DTerEst, Université Gustave Eiffel ex-IFSTTAR), deux EPIC (CSTB, LNE) et une entreprise (THEMACS Ingénierie). Ces différents partenaires sont impliqués à tous les niveaux dans le domaine du bâtiment et des infrastructures, depuis la recherche fondamentale jusqu'à la mise en œuvre sur le terrain en passant par la normalisation, la mesure et la formation. Plusieurs installations seront mises à disposition par les partenaires pour la qualification du prototype de mesure : chambres climatiques pour les essais en laboratoire, sites réels pour les qualifications de terrain. Dans la dernière phase du projet, des mesures seront effectuées sur chantier ou dans des bâtiments existants par des utilisateurs potentiels de l'appareil.

Méthodologie et contenu scientifique :

La méthodologie générale envisagée consiste à combiner les mesures actives avec des techniques inverses afin d'estimer la résistance thermique de murs fortement isolés et bio-sourcés. Le principe de l'approche active est de solliciter thermiquement l'une des surfaces de la paroi pour permettre une mesure rapide (moins de 48 h) et limiter l'influence des conditions météorologiques.

D'un point de vue numérique, les résultats du précédent projet RESBATI ont montré que les modèles physiques simplifiés RC ou la résolution de l'équation de la chaleur en 1D ne sont pas adaptés à une identification précise de la résistance thermique de murs fortement isolés et pour certaines typologies de murs [10,11]. Cela est dû aux flux thermiques transversaux dans la paroi qui ne sont pas pris en compte dans ces modèles. Par conséquent, pour étendre les travaux antérieurs aux murs hautement isolés et biosourcés, des modèles physiques 2D/3D et/ou hygro-thermiques plus sophistiqués devront être développés. Les temps de calcul étant plus importants pour ces modèles, des techniques de réduction de modèles seront étudiées afin de pouvoir implémenter ces modèles directs dans une méthode inverse permettant l'identification de la résistance thermique [12,13]. L'approche statistique d'inférence Bayésienne utilisée dans les travaux du précédent projet [10,11] devra être adaptée aux nouveaux modèles directs mis au point. L'utilisation de méthodes Bayésiennes doit en outre permettre d'obtenir un intervalle de confiance robuste sur la résistance thermique identifiée. L'approche proposée visera à obtenir le meilleur compromis entre le coût de calcul et la réduction de l'incertitude attendue pour identifier la résistance thermique de la paroi à caractériser. De plus, différentes sollicitations actives par contact seront étudiées, notamment par "multispot excitation" [14] consistant à chauffer simultanément le mur en différentes zones. La configuration de ce type de sollicitation thermique (géométrie, signal d'excitation) devra être optimisée par simulation. L'approche numérique développée sera finalement utilisée pour mener une analyse de sensibilité permettant l'optimisation de l'instrumentation du prototype (résistances chauffantes, thermocouples, flux-mètres, caméra thermique, etc.) et la définition des essais expérimentaux.

Le processus d'identification de la résistance thermique et le dispositif expérimental seront validés par des essais à différentes échelles. Des essais en laboratoire seront réalisés au Cerema, au CSTB et au LNE sur des parois spécialement conçues et instrumentées pour caractériser les propriétés physiques de l'isolant et des autres composants des murs sous différentes conditions d'humidité. Les typologies les plus classiques de paroi rencontrées seront abordées : isolation par l'intérieur (ITI), isolation par l'extérieur (ITE), paroi à ossature légère (bois), monomur (isolation répartie). La résistance thermique des murs d'essai sera comparée à celle obtenue à l'aide de normes de laboratoire telles que la boîte chaude gardée [1]. Des expérimentations complémentaires seront menées dans l'Equipement d'Excellence « Sense-City » de l'Université Gustave Eiffel où seront mises à disposition une maison en matériaux bio-sourcés et une maison en terre crue. L'enceinte climatique Sense-City étant montée sur rails, les essais pourront être réalisés en conditions contrôlées (température, humidité et éclairage) et en conditions réelles extérieures. L'EquipEx Sense-City servira également à valider la méthode sur un mur en béton d'un immeuble avant et après rénovation (isolation par l'intérieur). Enfin, le prototype sera testé dans des applications réelles avec de potentiels futurs utilisateurs. L'objectif est de l'évaluer dans un cadre opérationnel et de bénéficier d'un retour d'expérience.

Compétences souhaitées :

Le/la doctorant(e) aura en charge la modélisation des transferts dans les parois à caractériser et l'analyse des données expérimentales. Il/elle participera également à certaines campagnes de mesure. L'objectif principal de la thèse sera de mettre au point la méthode permettant d'identifier la résistance thermique de la paroi analysée à partir des modèles développés et des données expérimentales. Il/elle participera également à l'évaluation des incertitudes de mesure et à la détermination des limites d'utilisation du dispositif final.

- Modélisation des transferts thermiques et hydriques
- Utilisation de codes de simulation numérique (COMSOL Multiphysics, WUFI ou CAST3M par exemple)

- Utilisation de techniques inverses
- Notions sur les méthodes de réduction de modèles
- Programmation (Matlab, C++ ou Python)
- Connaissances en instrumentation et en métrologie thermique
- Bonne maîtrise de la langue anglaise
- Esprit d'initiative, adaptabilité et bon relationnel

Lieux de travail :

- CERTES, UPEC, Créteil-Sénart, France (lieu principal)
- CSTB, Champs-sur-Marne, France
- Déplacements prévus pour campagnes de mesure (notamment à Sense-City, Champs-sur-Marne et au Cerema, Nancy)

Contrat :

- Début de la thèse à l'automne 2022
- Financement ANR, durée de 36 mois

Encadrement de la thèse / Contacts :

Ce projet de thèse sera dirigé par Laurent IBOS, Professeur d'Université au CERTES. Le co-encadrement de cette thèse sera assuré par Vincent FEUILLET, Maître de Conférences au CERTES et par Kamel ZIBOUCHE, Ingénieur de Recherche au CSTB.

Pour plus d'informations sur le poste proposé et pour candidater (lettre de motivation et CV), contactez par e-mail :

Laurent IBOS, CERTES – Université Paris-Est Créteil Val de Marne
 ibos@u-pec.fr

Vincent FEUILLET, CERTES – Université Paris-Est Créteil Val de Marne
 vincent.feuillet@u-pec.fr

Kamel ZIBOUCHE, CSTB
 kamel.zibouche@cstb.fr

Références :

- [1] ISO 8990:1994. Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box, ISO standard, 1994.
- [2] ISO 9869-1:2014, Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method, ISO standard, 2014.
- [3] ISO 9869-2:2018, Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 2: Infrared method for frame structure dwelling, ISO standard, 2018.
- [4] V. Gori, C.A. Elwell, Estimation of thermophysical properties from in-situ measurements in all seasons: Quantifying and reducing errors using dynamic grey-box methods, *Energy and Buildings*, 167, 290–300, 2018.
- [5] B. Tejedor, M. Casals, M. Macarulla, A. Giretti, U-value time series analyses: Evaluating the feasibility of in-situ short-lasting IRT tests for heavy multi-leaf walls, *Building and Environment*, 159, 106123, 2019.

- [6] A. Rasooli, L. Itard, In-situ rapid determination of walls' thermal conductivity, volumetric heat capacity, and thermal resistance, using response factors, *Applied Energy*, 253, 2019.
- [7] M.H.A. Larbi Youcef, V. Feuillet, L. Ibos, Y. Candau, In situ quantitative diagnosis of insulated building walls using passive infrared thermography, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, DOI: 10.1080/17686733.2020.1805939, 2020.
- [8] A. François, L. Ibos, V. Feuillet, J. Meulemans, Estimation of the thermal resistance of a building wall with inverse techniques based on rapid in situ measurements and white-box or ARX black-box models, *Energy and Buildings*, 226:110346, 2020.
- [9] E. Biteau, D. Defer, F. Brachelet, L. Zalewski, Active Thermal Method Applied to the In Situ Characterization of Insulating Materials in a Wall, *Buildings*, 11, 578, 2021.
- [10] T.-T. Ha, V. Feuillet, J. Waeytens, K. Zibouche, S. Thébault, R. Bouchié, V. Le Sant, L. Ibos, Benchmark of identification methods for the estimation of building wall thermal resistance using active method: numerical study for IWI and single-wall structures, *Energy and Buildings*, 224:110130, 2020.
- [11] T.-T. Ha, Measurement of the thermal resistance of opaque building wall by active method, *Thèse de Doctorat, Université Paris-Est Créteil*, 2020.
- [12] H. Orlande, O. Fudym, D. Maillet & R. Cotta, *Thermal Measurements and Inverse Techniques*, CRC Press, Boca Raton, 2011.
- [13] R. Chakir, Y. Maday, P. Parnaudeau, A non-intrusive reduced basis approach for parametrized heat transfer problems, *Journal of Computational Physics*, 376, 617-633, 2019.
- [14] S. Hwang, J. Choi, J. Yang, H. Sohn, Multi-spot Laser Scanning Thermography for Delamination Inspection in CFRP/GFRP Structure, 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, University of Illinois, Urbana-Champaign, United States, August 1-2, 2015.