

Etude comparative de méthodes inverses pour l'identification *in-situ* de la résistance thermique de parois par des essais virtuels

Julien Waeytens¹, Thanh-Tung Ha², Vincent Feuillet², Kamel Zibouche³, Simon Thebault³, Rémi Bouchie³, Véronique Le Sant⁴, Laurent Ibos²

¹ Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Marne la Vallée, France

² CERTES, Université Paris-Est Créteil, Créteil, France

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Champs-sur-Marne, France

⁴ Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), Trappes, France

RESUME En France, le secteur du bâtiment existant représente environ 45% de la consommation d'énergie finale. Ainsi, d'importantes économies d'énergie peuvent être réalisées dans ce secteur. Un des leviers d'actions consiste à améliorer l'isolation des bâtiments. Pour cela, nous proposons une méthode active couplant mesures et modèles physiques afin d'identifier *in-situ* sur un temps court la résistance thermique de parois avant et après une action de rénovation. Dans ce papier, trois méthodes inverses sont proposées et comparées à l'aide d'essais virtuels sur des parois de type « isolation thermique intérieur » (ITI) et mono-mur. Les premiers résultats montrent que les modèles RC peuvent être utilisés afin d'identifier, avec une bonne précision et à moindre coût de calcul, la résistance thermique de parois ITI. Par contre, un modèle basé sur les équations de la chaleur en unidimensionnel doit être privilégié pour les parois mono-murs.

Mots-clefs thermique du bâtiment, résistance thermique, problèmes inverses, méthode active.

I. INTRODUCTION

En France, le gouvernement a fixé un objectif de réduction de la consommation d'énergie finale de 50% en 2050 par rapport à 2012. Avec 45% de la consommation finale d'énergie, le secteur du bâtiment existant représente un important gisement d'économie. Dans ce secteur, on peut citer trois principaux leviers d'actions : la rénovation des bâtiments existants, le contrôle optimal des équipements et la sensibilisation des usagers. Dans ce papier, on s'intéresse à la première action, *i.e.* la rénovation. Les enjeux portent sur le diagnostic thermique des bâtiments existants afin de détecter les bâtiments mal isolés et l'évaluation de l'isolation effective de la paroi suite à une opération de rénovation afin de s'assurer que les travaux ont été bien effectués. Pour cela, il est nécessaire de développer une stratégie pour l'identification rapide *in-situ* de la résistance thermique de parois. En pratique, il existe des équipements tels que la boîte chaude gardée pour évaluer la résistance thermique d'une paroi en laboratoire. Concernant l'évaluation *in-situ*, des méthodes normalisées sont proposées comme la méthode *ISO-9869-1:2014*. Cependant, ces méthodes s'appuient sur des hypothèses simplificatrices de stationnarité et sont très dépendantes des

conditions climatiques, car ce sont des méthodes passives. Dans ce papier, on propose une méthode active couplant mesure et modèles physiques pour l'identification *in-situ* sur des temps courts de la résistance thermique de parois. Une première validation numérique de la méthode est proposée via des essais virtuels sur un benchmark numérique.

II. Prototypage d'une méthode d'évaluation *in-situ* de résistance thermique de parois

A. Méthode active pour l'évaluation *in-situ* de la résistance thermique de paroi

A partir des travaux antérieurs (Larbi Youcef et al, 2010), une méthode active a été proposée afin d'identifier la résistance thermique sur une période d'observation d'environ une journée. La face intérieure de la paroi est sollicitée de façon active via des lampes sur une surface de 60cm× 60cm. Côté instrumentation, les surfaces intérieure et extérieure de la paroi sont équipées de capteurs de température ainsi que de fluxmètres. Des capteurs de température sont également déployés à l'intérieur du bâtiment et à l'extérieur. Cet ensemble de capteurs permet d'avoir des informations sur les sollicitations thermiques (lampes, conditions climatiques extérieures, ...) et sur la réponse thermique dynamique de la paroi. Un schéma du dispositif est donné sur la Figure 1.

Pour identifier les caractéristiques thermiques de la paroi et ainsi en déduire sa résistance thermique, des méthodes inverses (détaillées dans la section III.) sont mises en œuvre. Seule la température de surface de la paroi intérieure, mesurée au centre de la zone de la sollicitation active, est exploitée dans la fonctionnelle d'écart entre simulation et mesure pour le recalage des paramètres des modèles thermiques. Les autres mesures réalisées sont considérées comme des données d'entrée du modèle direct.

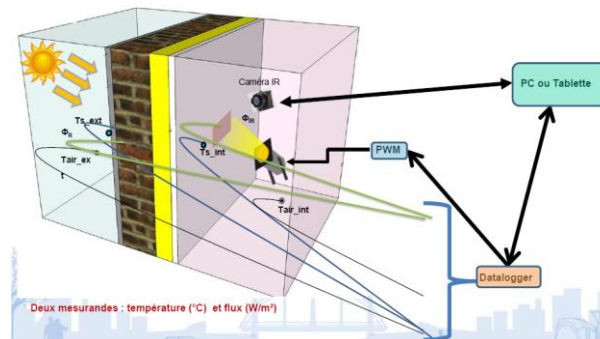


FIGURE 1. Dispositif pour l'évaluation *in-situ* de la résistance thermique de paroi

B. Démarche et génération des mesures par des essais virtuels

Dans une première phase, l'approche a été testée à l'aide de mesures issues d'essais virtuels où les caractéristiques thermiques des parois sont connues. Les mesures ont été générées numériquement à l'aide de logiciels de calculs de thermique dynamique à partir d'une modélisation 3D. Un bruit de mesure a été ajouté aux données simulées. Dans cette étude numérique, 10 parois ITI et 5 parois mono-murs ont été considérées avec des résistances thermiques allant de 0,92 à 8,37 m².K/W.

III. Méthodes inverses et résultats numériques d'identification

A. Présentation des méthodes inverses étudiées

Trois méthodes inverses sont proposées pour l'identification de la résistance thermique de parois :

- Méthode inverse CSTB : inspirée de la méthode ISABELE (Thébault & Rouchié, 2018) pour l'identification des caractéristiques thermiques à l'échelle du bâtiment. Dans cette approche, des modèles RC sont considérés. Les capacités thermiques et les résistances thermiques du modèle de paroi sont identifiées par une méthode Bayésienne. Le formalisme Bayésien permet d'obtenir naturellement un intervalle de confiance sur la résistance thermique totale.
- Méthode inverse CERTES : la paroi est modélisée à l'aide de l'équation différentielle partielle (EDP) de la chaleur en une dimension (1D). Concernant l'identification, une approche Bayésienne est utilisée pour déterminer la capacité et la conductivité thermique de chacune des couches de la paroi. A partir des paramètres identifiés, on en déduit un intervalle de confiance sur la résistance thermique totale.
- Méthode inverse Univ Gustave Eiffel : comme dans l'approche CERTES, on considère l'EDP de la chaleur en 1D avec chacune des couches de la paroi. Une méthode inverse déterministe, *i.e.* minimisation d'une fonctionnelle d'écart aux mesures avec un terme de régularisation de Tikhonov (Tikhonov & Arsenin, 1977), est mise en œuvre pour l'identification des caractéristiques thermiques de chacune des couches. Une méthode de descente dont le gradient est obtenu par l'état adjoint est implémentée. Le paramètre de régularisation de Tikhonov est choisi afin de vérifier un principe de discrétisation étendue prenant en compte l'erreur de mesure et l'erreur de modèle (Djatouti et al, 2020). Un intervalle de confiance pour la résistance thermique totale est obtenu à l'aide d'un tracé des isovaleurs de la fonctionnelle d'écart aux mesures.

Pour plus de détails, on pourra se référer à l'article (Ha et al, 2020).

B. Résultats numériques d'identification et conclusions

Les résultats des résistances thermiques identifiées et des incertitudes associées pour les parois ITI et mono-murs pour un temps d'observation de 24h sont synthétisés sur la Fig. 2. On constate que l'approche CSTB utilisant des modèles RC permet de déterminer avec un faible coût de calcul et avec une bonne précision (à +/- 20%) la résistance thermique des parois ITI allant de 1 à 6 m².K/W. Par contre, pour les parois mono-murs les résultats d'identification sont de moins bonne qualité du fait d'une erreur de modèle importante liée à la non prise en compte des flux de chaleur latéraux dans la paroi. Dans la méthode inverse CSTB, l'utilisation de modèles RC sans prise en compte de l'erreur de modèle entraîne une identification biaisée. Seule la méthode inverse Univ. Eiffel exploitant l'EDP de la chaleur en 1D avec prise en compte de l'erreur de modèle permet d'obtenir une identification sans biais mais présentant de fortes incertitudes (jusqu'à 40%).

En conclusion, d'après ces premiers tests sur un benchmark numérique, une identification précise de la résistance thermique de parois ITI peut être obtenue avec un modèle RC. Pour les parois mono-murs, il est recommandé d'utiliser *a minima* un modèle basé sur l'EDP de la chaleur en 1D avec une prise en compte de l'erreur de modèle dans le processus d'inversion.

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR) pour le soutien financier du projet RESBATI.

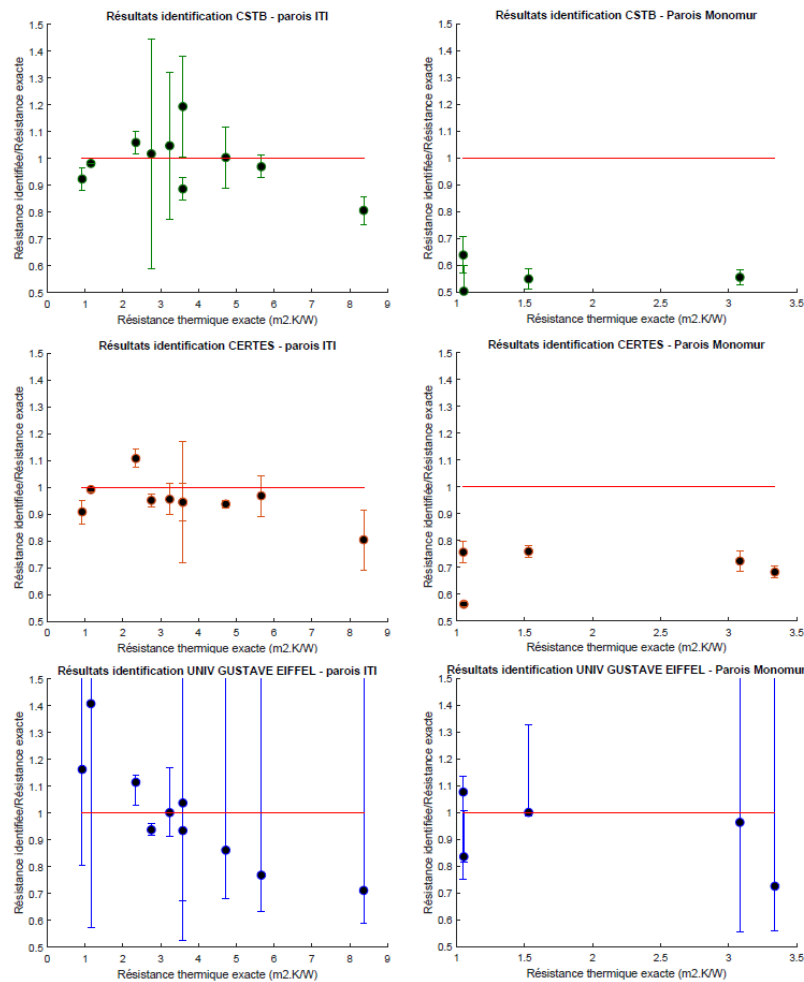


FIGURE 2. Résultats identification pour les parois ITI (haut) et mono-murs (bas) - temps d'observation de 24h

REFERENCES

- Djatouti, Z., Waeytens, J., Chatellier, P., & Chamoin, L. (2020). Coupling a goal-oriented inverse method and proper generalized decomposition in building thermal problems. *Building Simulation*, 13, 709-727.
- Youcef L., Feuillet, V., Ibos, *et al.* (2011). Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography. *Quanti. Inf. Thermog. J.*, 8(1), 65-87.
- Thébault, S., & Bouchié, R. (2018). Refinement of the ISABELE method regarding uncertainty quantification and thermal dynamics modelling. *Energy and Buildings*, 178, 182-205.
- Tikhonov, A., & Arsenin, Y. (1977). *Solutions to ill-posed problems*. Ed. Wiley.
- Ha, T.-T., Feuillet, V., Waeytens, J., Zibouche, ... & Ibos, L. (2020). 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.