



**HAL**  
open science

## **Benchmark de méthodes d'identification de paramètres sur données simulées : application à la mesure sur site de la résistance thermique de parois de bâtiments par méthode active**

Thanh-Tung Ha, Vincent Feuillet, Laurent Ibos, Julien Waeytens, Kamel Zibouche, Simon Thebault, Rémi Bouchie, Véronique Le Sant

### **► To cite this version:**

Thanh-Tung Ha, Vincent Feuillet, Laurent Ibos, Julien Waeytens, Kamel Zibouche, et al.. Benchmark de méthodes d'identification de paramètres sur données simulées : application à la mesure sur site de la résistance thermique de parois de bâtiments par méthode active. Congrès Français de Thermique SFT 2019, Jun 2019, Nantes, France. hal-04281766

**HAL Id: hal-04281766**

**<https://hal.u-pec.fr/hal-04281766v1>**

Submitted on 13 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Benchmark de méthodes d'identification de paramètres sur données simulées : application à la mesure sur site de la résistance thermique de parois de bâtiments par méthode active

Thanh-Tung HA<sup>1</sup>, Vincent FEUILLET<sup>1</sup>, Laurent IBOS<sup>1</sup>, Julien WAEYTENS<sup>2</sup>, Kamel ZIBOUCHE<sup>3</sup>, Simon THEBAULT<sup>3</sup>, Rémi BOUCHIE<sup>3</sup>, Véronique LE SANT<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CERTES, Université Paris-Est Créteil, 61 Av. du Général De Gaulle, 94000 Créteil

<sup>2</sup>IFSTTAR, Cité Descartes, 14-20 Bd Newton, 77420 Champs-sur-Marne

<sup>3</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 Av. Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne

<sup>4</sup>Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), 29 Rue Roger Hennequin, 78197 Trappes

\* (auteur correspondant : [ibos@u-pec.fr](mailto:ibos@u-pec.fr))

**Résumé** – Ce travail porte sur la réalisation d'un benchmark de méthodes d'identification en vue de mesurer sur site la résistance thermique de parois de bâtiment par thermographie infrarouge active. Les mesures virtuelles sont générées à l'aide de différents Modèles Physiques Générateurs. Plusieurs méthodes d'estimation de paramètres sont comparées. Les résultats présentés se focalisent sur les parois ITI (Isolation Thermique par l'Intérieur) et montrent qu'une estimation satisfaisante de la résistance thermique de la paroi est possible dans de nombreux cas.

## Nomenclature

$T$	température, K	$\lambda$	conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$R$	résistance thermique, $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$	$\tau$	constante de temps, s
$C_p$	capacité thermique massique, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\Phi$	densité de flux, $\text{W.m}^{-2}$
$b$	effusivité thermique, $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$e$	épaisseur, m	$IR$	infrarouge
<i>Symboles grecs</i>		$S$	surface
$\alpha$	diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$i$	intérieur
$\rho$	masse volumique, $\text{kg.m}^{-3}$	$e$	extérieur

## 1. Introduction

La résistance thermique est l'un des paramètres traduisant la qualité de l'isolation thermique de l'enveloppe d'un bâtiment. La valeur de la résistance thermique figure parmi les objectifs de consommation imposés par la réglementation thermique (valeurs minimales de  $3 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  en 2005 et de  $4 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  en 2012). Il existe actuellement différentes méthodes passives, normalisées ou non, permettant d'estimer ce paramètre [1-5] mais elles ne remplissent pas toutes les conditions garantissant une mesure systématique. Le projet ANR RESBATI vise à développer un dispositif de mesure de la résistance thermique utilisable sur le terrain pour tout type de paroi et de bâtiment, à tout moment de l'année. Il devra en outre être simple d'utilisation, d'un coût de revient modéré et aboutir à une faible durée de mesure. L'appareil repose sur la mise en œuvre d'une méthode active assurant l'excitation thermique de la paroi à caractériser.

La tâche « Etude de la robustesse des méthodes » du projet RESBATI vise à tester les modèles et méthodes d'identification des partenaires du projet (CERTES, CSTB, IFSTTAR, LNE). Un benchmark d'identification a été effectué pour évaluer la capacité d'identification des modèles (valeur estimée, incertitude, durée de calcul) en fonction des caractéristiques

d'essai (type de paroi, conditions météorologiques, durée de l'essai...). Ce benchmark était une étape préalable au dimensionnement du prototype d'appareil de mesure en cours de test actuellement. Cet article est consacré à la présentation des principaux résultats de ce benchmark. Nous nous focaliserons sur le cas concernant l'estimation de résistance thermique sur des parois opaques de bâtiments avec isolation rapportée par l'intérieur (ITI), qui est le mode constructif de loin le plus courant en France.

## 2. Méthodologie générale adoptée

### 2.1. Méthodologie générale adoptée

La figure 1 détaille la démarche d'ensemble du benchmark réalisé. Dans un premier temps, la précision des modèles de calcul des partenaires a été examinée dans le cadre d'une comparaison sur différents cas tests de paroi (vérification des Modèles Physiques Générateurs – MPG). Le travail bibliographique réalisé dans le projet RESBATI a permis de définir les typologies de paroi les plus pertinentes à simuler dans les identifications, ainsi que les autres paramètres intervenant dans la simulation des phénomènes thermiques (conditions limites, durée, type de sollicitations...). Dans un troisième temps, les MPG et les typologies de paroi et conditions associées ont été utilisés afin de générer des données mesurées virtuelles mises à disposition de manière anonyme. Enfin, chaque partenaire participant à la tâche a mis en œuvre sa méthode d'identification sur les données de mesure générées précédemment en vue d'estimer en aveugle la résistance thermique de la paroi étudiée et son incertitude associée.

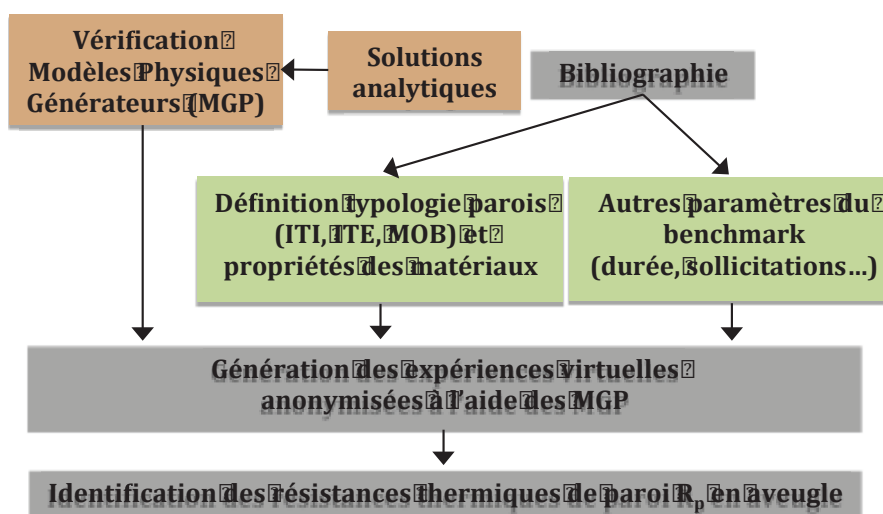


Figure 1 : Méthodologie générale du benchmark d'identification

### 2.2. Modèles Physiques Générateurs (MPG)

Les Modèles Physiques Générateurs 3D utilisés par les partenaires sont les suivants :

- Voltra : logiciel commercial utilisé par le CSTB basé sur la méthode des éléments finis. Il permet la simulation des transferts de chaleur en régime transitoire 3D pour des problèmes de conduction thermique dont la géométrie fait intervenir des blocs parallélépipédiques.

- Comsol Multiphysics : logiciel commercial de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis, utilisé par le LNE.

- Quadripôles thermiques : méthode de résolution semi-analytique (transformations intégrales), utilisée par le CERTES, adaptée à la conduction de la chaleur dans des

empilements multicouches. La transformation intégrale mise en œuvre sur le temps est la transformée de Laplace [6].

## 2.3. Cas tests considérés

### 2.3.1. Géométrie de la paroi et propriétés thermophysiques

Différentes typologies de parois ont été testées dans le cadre de ce benchmark : isolation rapportée par l'intérieur (ITI) ou par l'extérieur (ITE), mur à isolation répartie, double-paroi, murs à ossature bois (MOB). Comme précisé en introduction, nous nous focaliserons dans cet article sur le cas ITI. La structure du mur considéré est présentée sur la figure 2. Le mur est composé de quatre couches : enduit extérieur, mur porteur, couche isolante, parement intérieur. Une zone de 2 mètres de côté est considérée. Afin de générer à l'aide des MGP les mesures virtuelles pour les identifications, les propriétés des couches ont été choisies au hasard conformément aux données du tableau 1.

	$e$ m	$\lambda$ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\rho$ $\text{kg.m}^{-3}$	$C_p$ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Enduit extérieur	0,01 à 0,03	0,3 à 1,8	500 à 2000	1000
Mur support	0,15 à 0,3	0,1 à 2,3	650 à 2500	1000
Isolant	0,04 à 0,2	0,02 à 0,06	30 à 150	900 à 1400
Parement intérieur	0,01 à 0,03	0,2 à 0,8	600 à 1500	1000

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques considérées pour les simulations numériques

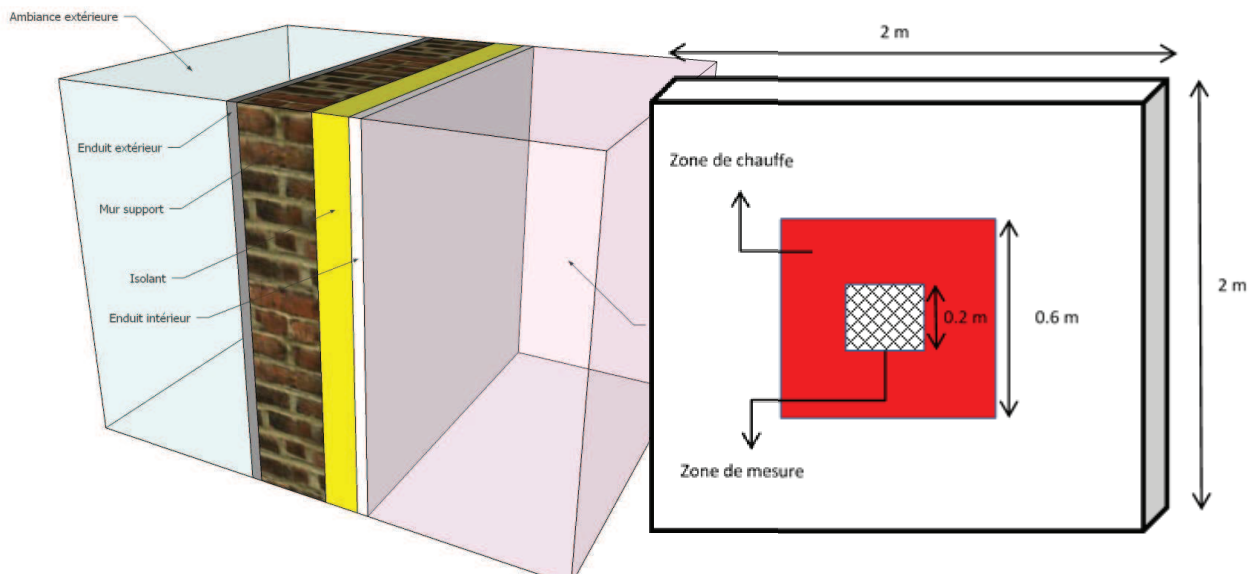


Figure 2 : Paroi considérée (structure et dimensions)

### 2.3.2. Sollicitations intérieures

L'ambiance du local intérieur est chauffée et régulée à la température  $T_i = 20^\circ\text{C}$ . L'excitation thermique de la paroi est imposée côté intérieur. La zone de chauffage de la paroi est située au centre du mur et a une taille de 60 cm de côté (Cf figure 2). L'excitation thermique est produite par des lampes (Cf figure 3). Une excitation de type créneau de puissance est considérée :  $0 \text{ W/m}^2$  pendant la première heure du test, puis  $\Phi_{\text{IR}} = 400 \text{ W/m}^2$  jusqu'à la fin de la simulation (72 heures). On considère que la puissance émise est égale à la puissance absorbée (chauffage avec rayonnement infrarouge pour une émissivité  $\varepsilon$  égale à 1).

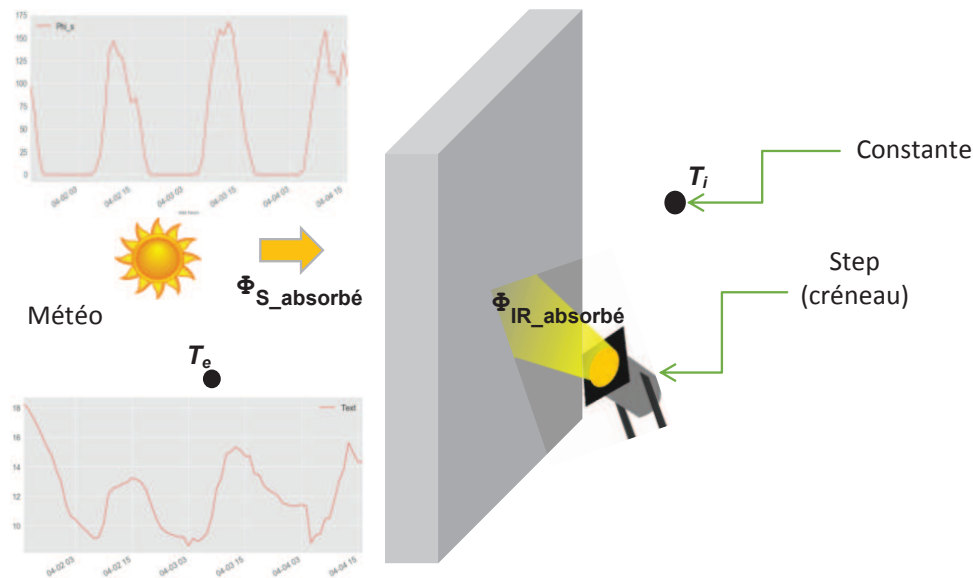


Figure 3 : Conditions aux limites imposées sur la paroi

### 2.3.3. Sollicitations extérieures

Deux climats extérieurs sont considérés à partir de fichiers météo de durée égale à 3 jours : climat de Trappes au mois d'avril avec une paroi orientée nord d'une part et climat de Carpentras au mois d'octobre avec une paroi orientée sud d'autre part. On considère un albédo de la surface extérieure égal à 0,6. On néglige le rayonnement grandes longueurs d'ondes avec l'environnement (sol, ciel, parois environnantes). On néglige également les influences de l'humidité et de la pluie.

### 2.3.4. Conditions initiales et aux limites

La température initiale dans la paroi est considérée homogène égale à 20°C. Les échanges thermiques avec l'air intérieur et extérieur sont modélisés par des coefficients d'échange thermique fixés aux valeurs de la réglementation thermique : 7,7 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> pour la paroi intérieure et 25 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> pour la paroi extérieure [7].

### 2.3.5. Données de mesure

Les données mesurées sont issues de simulations 3D en régime transitoire obtenues à l'aide des MPG (Voltra, Comsol, quadripôles). Elles servent d'input pour les modèles d'identification (voir section suivante). La zone de mesure est représentée sur la figure 2. La température moyenne sur cette zone est calculée par chaque MGP. Les données sont enregistrées sous forme de séries temporelles avec des intervalles de 10 secondes les 20 premières minutes, puis de 30 secondes par la suite. La durée totale des simulations est de 72 heures. Les signaux de température et flux sont bruités en utilisant des bruits obtenus expérimentalement sur des thermocouples et des plaques fluxmétriques de caractéristiques proches de ceux utilisés dans le prototype. Ces bruits ont été enregistrés pendant 72 heures.

## 3. Méthodes d'identification

Trois méthodes d'identification sont comparées. Chacune de ces méthodes est proposée et utilisée par un partenaire du projet (CSTB, IFSTTAR, CERTES) en utilisant les mêmes données générées « virtuellement ». Les identifications sont réalisées « en aveugle ».

### 3.1. Méthode des éléments finis et algorithme à direction de descente (IFSTTAR)

Le modèle direct de la procédure d'inversion mise en place par l'IFSTTAR fait appel à la méthode des éléments finis et un schéma Euler implicite en temps permettant la résolution du système d'équations aux dérivées partielles associé au problème de conduction thermique de la paroi (équation de la chaleur 1D transitoire dans chaque couche et conditions limites de troisième espèce avec coefficient d'échange sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi). L'inversion utilise un algorithme de type « direction de descente » incluant le calcul d'un terme de régularisation [8]. Le coefficient de régularisation est choisi afin de satisfaire un principe de discrédance étendu prenant en compte les erreurs de mesure et de modèle. La figure 4 représente schématiquement la procédure d'inversion développée. L'intervalle de confiance sur la résistance thermique identifiée est obtenu grâce au tracé d'iso-valeurs de la fonctionnelle du problème de recalage.

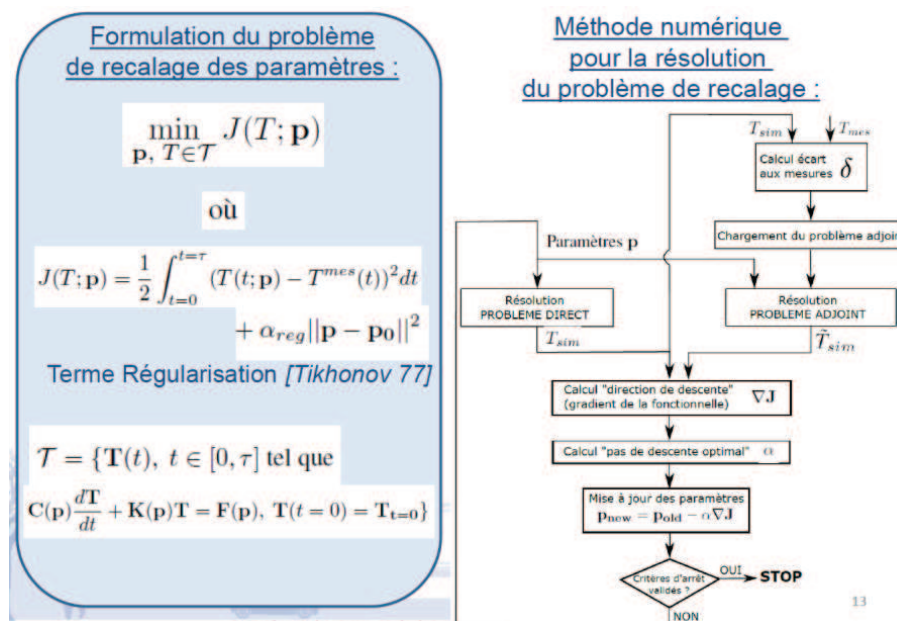


Figure 4 : Représentation schématique de la procédure d'inversion développée par l'IFSTTAR

### 3.2. Méthode des quadripôles thermiques et estimation bayésienne (CERTES)

Le modèle direct intervenant dans l'algorithme de minimisation développé par le CERTES repose sur la méthode des quadripôles thermiques en géométrie 1D et régime transitoire. Celle-ci permet de relier par l'intermédiaire d'une matrice de transfert  $M$  les températures  $\hat{T}$  et flux  $\hat{\phi}$  dans l'espace de Laplace entre les surfaces intérieure et extérieure du mur :

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_{SI} \\ \hat{\phi}_{SI} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \hat{T}_{SE} \\ \hat{\phi}_{SE} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Elle est particulièrement adaptée à un algorithme d'inversion nécessitant de nombreuses résolutions du modèle direct en raison de temps de calcul très courts en 1D (0.19 s pour un pas de temps de 30 s et une durée de simulation de 3 jours avec l'algorithme de De Hoog [9] pour l'inversion numérique de la transformée de Laplace).

La minimisation fait appel à un algorithme basé sur l'inférence bayésienne [10] permettant de former par tirage aléatoire une distribution des paramètres à estimer. Pour chaque tirage, l'algorithme calcule la probabilité des données simulées pour les paramètres tirés par comparaison avec les données mesurées. Ce tirage est accepté si sa probabilité est supérieure

au cas précédent, dans le cas contraire il est refusé. Un sous-algorithme « Robust adaptive Metropolis » (RAM) [11] est utilisé pour optimiser le tirage aléatoire selon la probabilité de l'itération précédente et réduire le nombre d'itérations nécessaires. Chaque identification nécessite de nombreux tirages aléatoires pour obtenir une distribution complète de chaque paramètre. Dans la procédure d'inversion proposée (Cf figure 5), la conductivité thermique  $\lambda$  et le produit entre la densité volumique et la capacité thermique  $\rho C_p$  de chaque couche de la paroi étudiée sont estimés en fixant l'épaisseur de la couche (calculée à partir de l'épaisseur totale de la paroi supposée mesurable). L'algorithme de minimisation identifie pour chaque couche le rapport de la valeur du paramètre sur la valeur initiale (équation (2)). La donnée à minimiser dans l'identification est la température de surface intérieure  $T_{SI}$ . En fin de processus d'identification, deux vecteurs (valeur moyenne  $\mu$  et l'écart-type  $\sigma$ ) sont obtenus pour l'ensemble des paramètres à partir des distributions finales estimées. La résistance thermique de la paroi et son incertitude s'obtiennent à partir de l'équation (3).

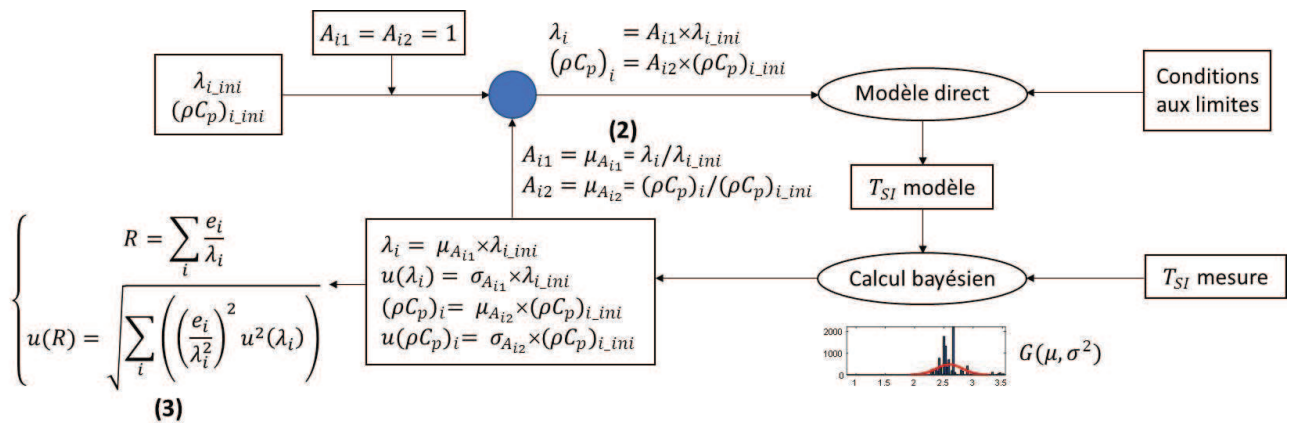


Figure 5 : Représentation schématique de la procédure d'inversion développée par le CERTES

### 3.3. Modèle RC et Méthode ISABELE (CSTB)

Le CSTB utilise des modèles RC comme modèle direct pour l'identification (une banque de modèles plus ou moins complexes est disponible selon la composition du mur). La méthode d'identification est basée sur la méthode ISABELE, développée initialement pour évaluer la performance de l'enveloppe globale du bâtiment [12] et adaptée aux murs dans le cadre du projet RESBATI. L'identification des paramètres thermiques utilise une modélisation stochastique de type "boîte grise" avec une approche de type maximum de vraisemblance ("Maximum Likelihood"). Les paramètres estimés sont la résistance thermique du mur et sa capacité ainsi que les incertitudes associées. L'estimation de l'incertitude de la méthode ISABELE se base sur des méthodes d'inférence bayésienne pour les sources d'erreur aléatoires, combinées à des tirages de Monte-Carlo pour les sources d'erreurs systématiques (i.e. tirées dans un intervalle connu mais invariables pendant la durée de l'essai) [12].

## 4. Résultats

Une partie des résultats des estimations du benchmark est présentée sur la figure 6 : écarts relatifs en % entre les estimations de résistance thermique et les valeurs attendues et incertitudes sur les résistances estimées, pour deux durées d'analyse (12h et 48h), tracés en fonction de l'épaisseur totale de la paroi. Les résistances thermiques des parois considérées sont comprises entre 0,9 et 8,6  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ .

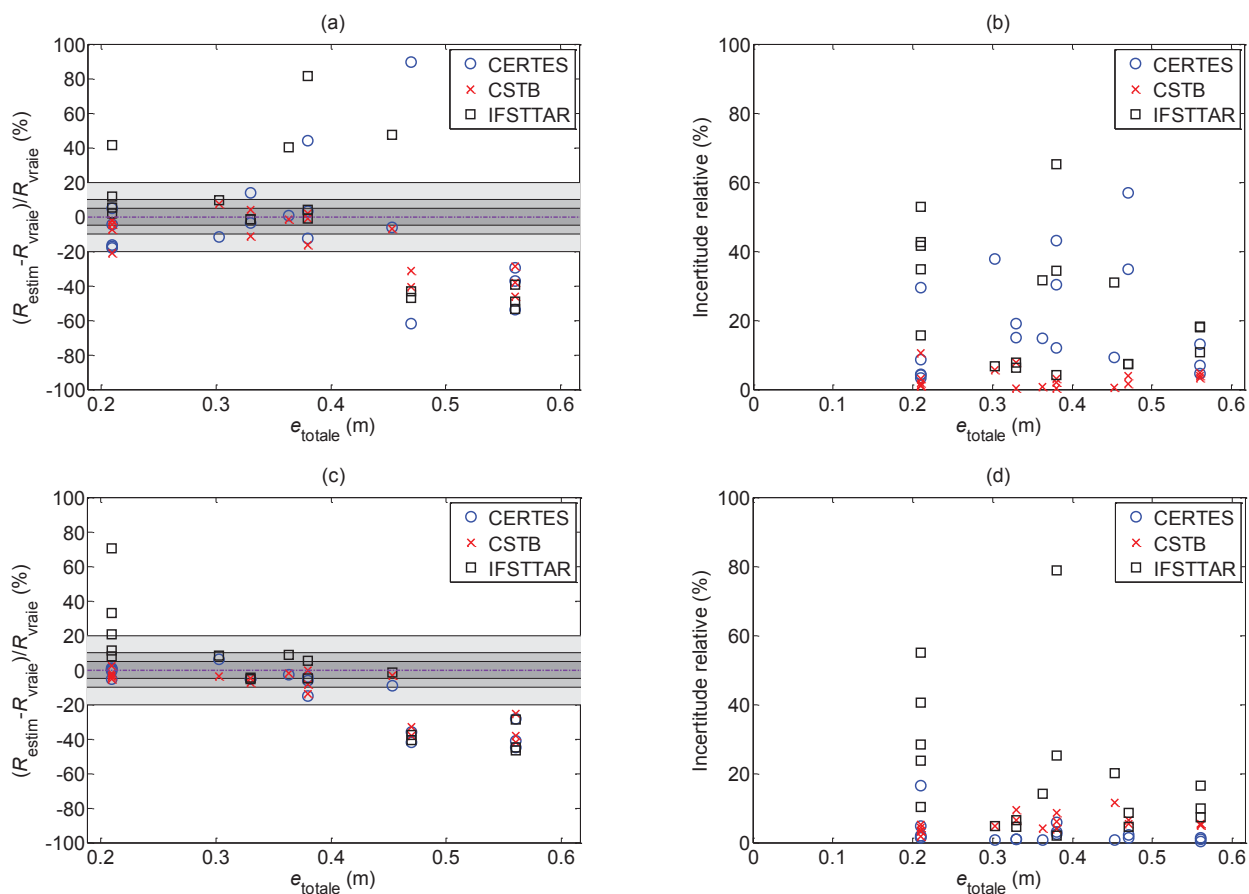


Figure 6 : Résultats d'identification du benchmark des différents modèles en fonction de l'épaisseur totale de la paroi ITI considérée – (a)-(b) Ecarts et incertitudes relatives pour une durée de mesure de 12h, (c)-(d) Ecarts et incertitudes relatives pour une durée de mesure de 48h

On observe sur la figure 6 que l'augmentation de la durée de mesure (ici de 12h à 48h) améliore les identifications pour chacune des méthodes utilisées dans le cas d'une paroi ITI. Les erreurs relatives sur les résistances vraies des parois se recentrent autour de la valeur 0 (figures 6(a) et 6(c)) tandis que la grande majorité des valeurs d'incertitudes diminuent (figures 6(b) et 6(d)). Ces différents graphiques montrent également que plus l'épaisseur totale de la paroi augmente, plus l'estimation de la résistance thermique de la paroi est difficile. C'est notamment le cas pour des parois de résistance thermique « modérée » (autour de 3 à 4  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ). Ceci s'explique par la présence d'un flux latéral important dans la paroi qui n'est pas pris en compte dans les modèles simplifiés utilisés pour l'identification et qui conduit à un biais sur l'estimation de résistance thermique. Le paramètre le plus limitant pour les estimations semble donc être l'épaisseur de la paroi, plus que la résistance thermique, *i.e.* il est possible d'estimer des résistances thermiques élevées avec un biais et des incertitudes faibles du moment que l'épaisseur de la paroi reste inférieure à environ 40 cm. Toutes les méthodes investiguées mènent sensiblement vers les mêmes résultats d'identification pour des niveaux d'incertitude de l'ordre de 10%. La méthode des éléments finis mise en œuvre par l'IFSTTAR mène généralement à des valeurs d'incertitude plus élevées.

Par ailleurs, les données météorologiques, l'orientation de la paroi et la période de l'année (Trappes-nord-printemps ou Carpentras-sud-automne) n'ont dans l'ensemble qu'assez peu d'influence sur les résultats obtenus. Il n'apparaît pas de tendance nette concernant ces critères. D'un point de vue temps de calcul, la procédure d'estimation utilisée par le CSTB est de loin la moins coûteuse (de l'ordre de la dizaine de secondes).



## 5. Conclusion

Cette étude du projet ANR RESBATI effectuée dans le cadre d'un benchmark a permis de tester la capacité de différentes méthodes d'identification à estimer la résistance thermique de parois de bâtiment par thermographie infrarouge active. Les parois ITI de moins de 40 cm d'épaisseur semblent adaptées à l'approche proposée. Les résultats obtenus sur d'autres typologies de paroi seront prochainement présentés (ITE, monomur, double-paroi, MOB). L'augmentation d'épaisseur de la paroi a systématiquement tendance à biaiser les mesures de la même manière. En effet, quel que soient les méthodes d'identification, elles conduisent à sous-estimer la résistance thermique de la paroi quand l'épaisseur augmente. Ce travail a permis le dimensionnement d'un prototype d'appareil de mesure qui est actuellement utilisé sur des parois d'essai en conditions de laboratoire. Il sera ensuite testé sur le terrain pour sa validation par les utilisateurs.

### Références

- [1] ISO 9869-1:2014, *Isolation thermique - Éléments de construction - Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique - Partie 1: Méthode du fluxmètre*, Norme ISO, 2014.
- [2] ISO 9869-2:2008, *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling*, Norme ISO, 2008.
- [3] R. Albatici, A. M. Tonelli, M. Chiogna, *A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance*, Applied Energy, 141, 218-228, 2015.
- [4] J. Meulemans, F. Alzetto, D. Farmer, C. Gorse, Christopher, *QUB/e - A novel transient experimental method for in situ measurements of the thermal performance of building fabrics*, International Sustainable Ecological Engineering Design for Society (SEEDS) Conference, Leeds (UK), 2016.
- [5] A. Janssens, *Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements*, Report of Subtask 1b: Overview of methods to analyse dynamic data, International Energy Agency, EBC Annex 58, 2016.
- [6] D. Maillet, *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*, John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [7] Réglementation thermique RT 2012, Ed. CSTB, 2012.
- [8] A. N. Tikhonov, V. Y. Arsenin, *Solutions of Ill-Posed Problems*, New York: Winston, 1977.
- [9] F. R. de Hoog, J. H. Knight, A. N. Stokes, *An improved method for numerical inversion of Laplace transforms*, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 3, 357-366, 1982.
- [10] M. E. Glickman, D. A. van Dyk, *Basic Bayesian Methods*, Methods in molecular biology, 404, 319-338, 2007.
- [11] M. Vihola, *Robust adaptive Metropolis algorithm with coerced acceptance rate*, Statistics and Computing, 22:5, 997-1008, 2012.
- [12] S. Thébault, R. Bouchié, *Refinement of the ISABELE method regarding uncertainty quantification and thermal dynamics modelling*, Energy and Buildings, 178, 182-205, 2018.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le soutien financier accordé au projet RESBATI.