



HAL
open science

Quantification par thermographie infrarouge des déperditions énergétiques d'une paroi de bâtiment liées aux ponts thermiques intégrés : essais en régime permanent et évaluation des incertitudes de mesure

Adrien François, Laurent Ibos, Vincent Feuillet, Johann Meulemans

► To cite this version:

Adrien François, Laurent Ibos, Vincent Feuillet, Johann Meulemans. Quantification par thermographie infrarouge des déperditions énergétiques d'une paroi de bâtiment liées aux ponts thermiques intégrés : essais en régime permanent et évaluation des incertitudes de mesure. 27ème Congrès Français de Thermique SFT 2019, Jun 2019, Nantes, France. hal-02403709

HAL Id: hal-02403709

<https://hal.science/hal-02403709>

Submitted on 16 Dec 2019

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.

Quantification par thermographie infrarouge des déperditions énergétiques d'une paroi de bâtiment liées aux ponts thermiques intégrés : essais en régime permanent et évaluation des incertitudes de mesure

Adrien FRANCOIS^{1,2*}, Laurent IBOS¹, Vincent FEUILLET¹, Johann MEULEMANS²

¹Université Paris-Est, CERTES, OSU-Efluve. 61 avenue du Générale de Gaulle, 94010 Cedex

²Saint-Gobain Research Paris. 39 quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers Cedex

*(auteur correspondant : adrien.francois@u-pec.fr)

Résumé - Cette étude porte sur la mesure des propriétés thermiques des ponts thermiques dans les bâtiments. La méthodologie est testée sur une maquette de mur en laboratoire. Les coefficients de transmission ψ ou χ de chacun des 3 types de ponts thermiques présents dans la maquette sont mesurés par thermographie infrarouge en régime stationnaire. Pour cela, le facteur d'impact I_{tb} des ponts est calculé. Dans la démarche proposée, la connaissance de l'émissivité de la surface n'est pas nécessaire car seules les températures apparentes sont exploitées. Les expériences ont montré une bonne reproductibilité ainsi qu'un bon accord avec des simulations numériques. Le calcul des incertitudes a permis d'identifier les principales sources d'erreur.

Nomenclature

I_{tb}	facteur d'impact de pont thermique	χ	transmittance ponctuelle, $W.K^{-1}$
L_{tb}	largeur d'influence de pont thermique	<i>Indices et exposants</i>	
R	résistance thermique, $m^2.K.W^{-1}$	$1D$	zone saine, 1D
T	température, K	app	apparente
U	transmittance surfacique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	e	extérieur
u	incertitude	env	environnement
<i>Symboles grecs</i>		i	intérieur
σ_{sb}	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$	ref	référence
ϕ	flux thermique, W	$stat$	statique
φ	flux thermique surfacique, $W.m^{-2}$	tb	pont thermique (thermal bridge)
ψ	transmittance linéique, $W.m^{-1}.K^{-1}$		

1. Introduction

L'isolation thermique d'un bâtiment ne peut pas être homogène. La présence notamment d'ouvrants, de jonctions plancher/mur et de systèmes mécaniques de fixation d'isolants génèrent des pertes de chaleur supplémentaires, appelées ponts thermiques. Ces derniers peuvent représenter jusqu'à 30% des besoins de chauffage d'un bâtiment [1]. On distingue les ponts thermiques de liaison (PTL, dus à la structure et à la géométrie du bâtiment) des ponts thermiques intégrés (PTI, dus à la fixation des matériaux isolants) [2]. C'est la seconde catégorie qui nous intéresse ici. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse portant sur la mesure des déperditions dues aux ponts thermiques par thermographie infrarouge active, c'est-à-dire en sollicitant thermiquement la paroi. Les travaux présentés ici sont le fruit d'une étude préliminaire centrée sur la caractérisation en régime statique des ponts thermiques présents dans une maquette de laboratoire. Les valeurs mesurées seront utilisées comme références pour la validation de la méthode en régime transitoire en cours de développement dans le cadre de ces travaux. L'originalité de la

démarche repose principalement sur le calcul du facteur d'impact I_{tb} (rapport du flux thermique sur le pont thermique au flux sur une zone saine du mur) uniquement par thermographie sans connaissance de l'émissivité de la paroi, ce qui diminue les incertitudes de mesure.

2. Dispositif Expérimental

2.1. Présentation de la maquette

Afin de tester la méthodologie de caractérisation des ponts thermiques par thermographie, une maquette de mur à l'échelle 1/1 a été construite en laboratoire. Comme présenté sur la figure 1, elle est composée de trois couches, respectivement en plâtre, en laine de verre et en polystyrène extrudé. La résistance globale du mur est de $2.9 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. A l'intérieur de la couche de laine de verre sont insérés des matériaux plus conducteurs afin de générer des ponts thermiques. On y trouve des éléments classiquement rencontrés dans les systèmes d'isolation par l'intérieur : un montant en bois, un rail métallique et deux chevilles métalliques. Un certain nombre de thermocouples (type-K) et de flux-mètres sont disposés à l'intérieur de la maquette et de la garde pour suivre l'évolution des températures et flux de chaleur.

De plus, une résistance chauffante plate est disposée à l'arrière de la maquette. Elle permet de créer un gradient thermique nécessaire à la visualisation des ponts thermiques. Enfin, l'ensemble est disposé dans une garde en polystyrène expansé : seule la face avant est apparente. La maquette est ensuite observée par une caméra thermique. La caméra utilisée est le modèle SC7000 du constructeur FLIR. Elle possède un capteur refroidi matriciel de 320×256 pixels sensible dans la bande $7.7\text{-}9.2 \mu\text{m}$ et de sensibilité 20 mK.

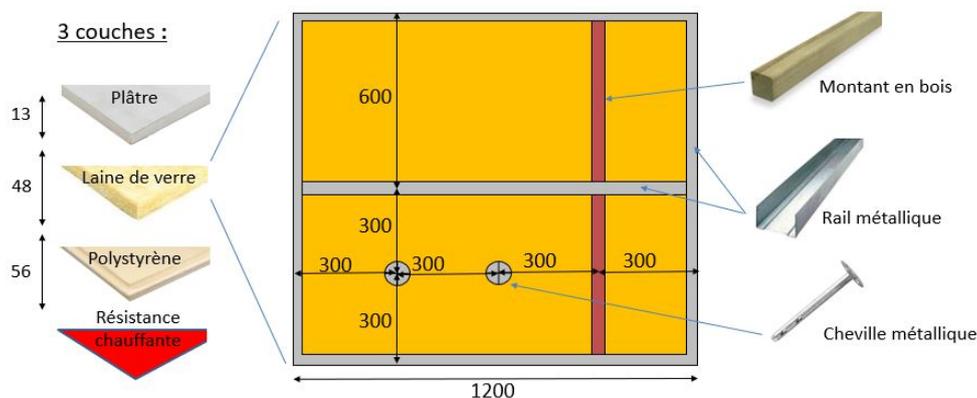


Figure 1: Présentation de la maquette utilisée (dimensions en mm)

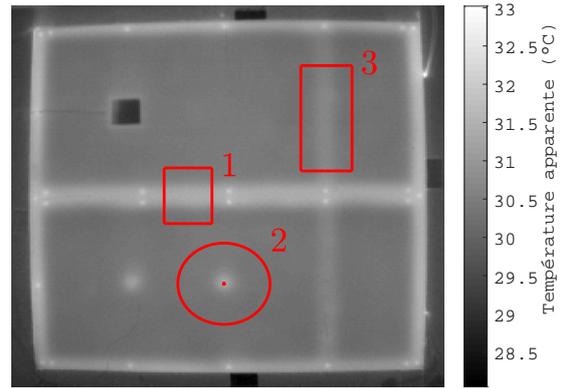
2.2. Images thermiques

Les figures 2a et 2b montrent la face avant de la maquette, respectivement dans le visible et dans l'infrarouge. L'image thermique présentée est une moyenne sur plusieurs heures de mesures en régime stationnaire (obtenue après avoir appliqué une puissance de 25 W sur le film chauffant pendant au moins 24h). Les ponts thermiques sont clairement visibles.

A partir du thermogramme enregistré par la caméra thermique, le profil de température apparente T^{app} au voisinage de chaque pont thermique peut être extrait, comme montré sur la figure 3.



(a) Photographie de la maquette dans sa garde



(b) Thermogramme de la maquette et zones d'intérêt desquelles sont extraits les profils de la Fig 3

Figure 2: Aperçu de la maquette dans le visible et dans l'infrarouge en régime stationnaire établi (puissance de chauffe de la résistance : 25W). Les ponts thermiques ainsi qu'un fluxmètre disposé en surface sont visibles.

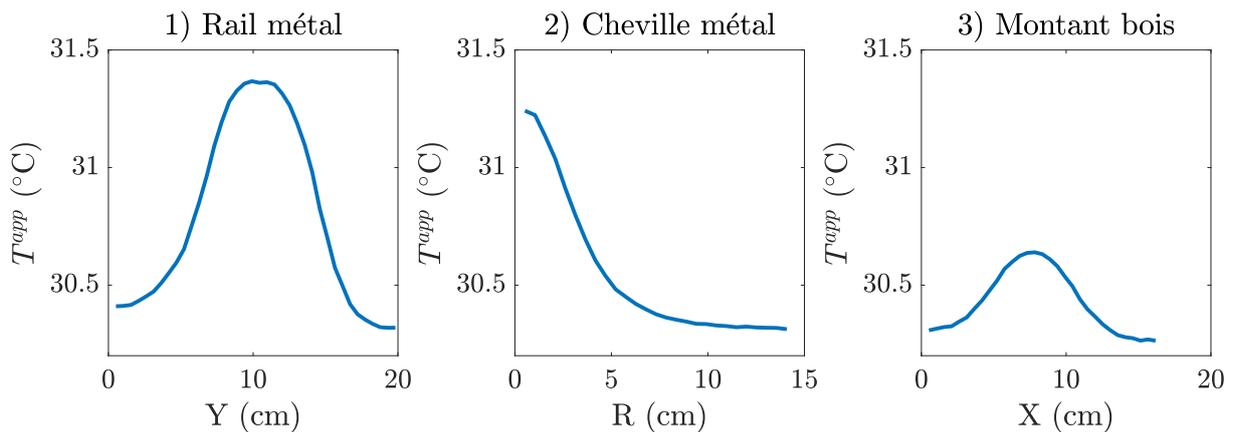


Figure 3: Profils de température apparente au voisinage de chaque pont (moyenne sur les zones d'intérêt de la Fig 2b). Le profil sur la cheville est un profil circulaire.

3. Méthodologie

Dans un premier temps, il est nécessaire de connaître le niveau d'isolation de la paroi sans pont thermique, caractérisé par le coefficient de transmission thermique U ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) (norme NF EN ISO 7345 :2018). Cela permet dans un second temps de calculer les coefficients de transmission lineique et ponctuel des ponts thermiques ψ et χ .

3.1. Calcul du coefficient de transmission thermique U

Le coefficient U d'une paroi est donnée par :

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{mur} + R_{se}} \quad (1)$$

avec $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ les résistances superficielles intérieure et extérieure (valeurs extraites de la norme ISO 14683 :2007) et R_{mur} la résistance thermique de la paroi. En régime stationnaire, cette dernière est égale au rapport du flux φ_{stat} sur la différence de température entre les deux faces ΔT_{stat} . En pratique, le flux et la température en face avant ont été mesurés grâce à un flux-mètre disposé sous la couche de plâtre car les mesures de flux en surface étaient trop bruitées. La résistance thermique de la couche de plâtre R_{gypse} n'est ainsi pas calculée mais supposée connue (elle ne représente que 2% de la résistance du mur). Il vient :

$$R_{mur} = R_{gypse} + \frac{\Delta T_{stat}}{\varphi_{stat}} \quad (2)$$

3.2. Calcul des coefficients de transmission des ponts thermiques

Les coefficients ψ et χ désignent respectivement les coefficients de transmission linéiques et ponctuel des ponts thermiques [2]. En régime stationnaire, le coefficient ψ s'écrit :

$$\psi = \frac{\phi_{tb}}{L_z \times \Delta T_{ie}} \quad (3)$$

qui s'exprime également par :

$$\psi = L_{tb}(U_{tb} - U_{1D}) \quad (4)$$

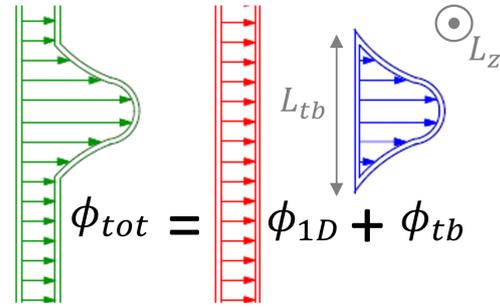


Figure 4: Illustration du flux supplémentaire ϕ_{tb} dû au pont thermique

Avec ϕ_{tb} le flux thermique additionnel uniquement dû au pont (comme illustré sur la figure 4), ΔT_{ie} la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et L_z la dimension transversale. U_{tb} est le coefficient de transmission surfacique moyen intégrant le pont thermique et U_{1D} le coefficient au niveau d'une zone saine de la paroi, exempte de pont thermique. L_{tb} correspond à la largeur de la zone d'influence du pont thermique (les transferts sont supposés 1D en dehors de cette zone). Asdrubali *et al.* ont introduit le facteur d'impact [3] :

$$I_{tb} = \frac{U_{tb} \text{ statique}}{U_{1D}} = \frac{\varphi_{tb}}{\varphi_{1D}} \quad (5)$$

Ainsi, les coefficients de transmission linéaire et ponctuel de pont thermique peuvent s'écrire en fonction de trois paramètres :

$$\psi = L_{tb}U_{1D}(I_{tb} - 1) \quad (6)$$

$$\chi = S_{tb}U_{1D}(I_{tb} - 1) \quad (7)$$

Avec S_{tb} la surface d'influence du pont thermique ponctuel. On considère ensuite l'hypothèse suivante :

$$I_{tb} = \frac{\varphi_{tb}^{rad}}{\varphi_{1D}^{rad}} \quad (8)$$

Cette équation est vraie si la température de l'air est égale à la température moyenne de l'environnement radiatif (hypothèse réaliste en intérieur) et si les coefficients d'échanges convectif

et radiatif sont supposés uniforme sur la paroi (hypothèse réaliste également grâce aux faibles différences de température entre le pont thermique et la zone saine). L'émissivité de la paroi doit également être uniforme. L'intérêt de faire cette hypothèse réside dans le fait que la mesure d'un flux radiatif avec une caméra thermique est directe et plus précise que celle d'un flux total. En effet, le flux radiatif s'expriment facilement en fonction des températures apparentes et ne dépend pas de l'émissivité de la paroi considérée :

$$\varphi^{rad} = \sigma_{sb} [(T^{app})^4 - (T_{env}^{app})^4] \quad (9)$$

avec σ_{sb} la constante de Stefan-Boltzmann. Ainsi, le facteur d'impact du pont thermique est donné par l'équation 10 :

$$I_{tb} = \sum_{pixels} \frac{T_{tb}^{app} - T_{env}^{app}}{T_{1D}^{app} - T_{env}^{app}} \quad (10)$$

Comme illustré sur la figure 5, le rapport des flux est calculé sur chaque pixel d'un profil de température apparente issu d'une image thermique.

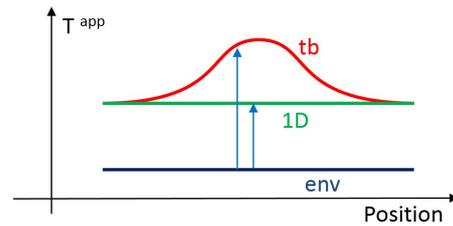


Figure 5: Exemple de profils de température apparente au voisinage d'un pont thermique

3.3. Simulations numériques

Les transferts thermiques dans la maquette ont été simulés par éléments finis grâce au logiciel COMSOL Multiphysics [4]. Les matériaux utilisés ont été caractérisés en laboratoire, exceptés les matériaux isolants pour lesquels les données constructeur ont été utilisées. Chaque pont thermique a été modélisé en 2D avec un modèle spécifique. Grâce aux symétries, seule la moitié des ponts thermiques est modélisée. Sur les faces avant et arrière, un coefficient d'échange et une température d'environnement uniforme sont définis. Le domaine est considéré suffisamment grand (50 cm de large) pour que les transferts soient bien unidirectionnels dans la paroi loin du pont. Un modèle 3D de la maquette complète a également été réalisé. Ces simulations ont été comparées avec les résultats expérimentaux.

4. Résultats

4.1. Résultats détaillés

Plusieurs expériences ont été réalisées sur la maquette afin de tester la méthodologie présentée précédemment. Les mesures ont eu lieu dans deux salles différentes, pour deux orientations de la maquette différentes et avec des puissances de chauffe différentes dans le but d'évaluer la reproductibilité de la méthode. Les résultats des estimations sont regroupés sur la figure 6 et synthétisés dans le tableau 1.

On observe d'abord que la reproductibilité est plutôt satisfaisante : la dispersion des résultats est de 4% pour le rail en métal et entre 10 et 15 % pour les autres ponts. Les meilleurs résultats obtenus sur le rail s'explique par un plus important contraste en température de surface que pour les autres ponts : la mesure par thermographie est alors plus précise. Par ailleurs, il y a un très bon accord entre les résultats expérimentaux et les prédictions des simulations numériques. Cet écart, qui est inférieur à 2%, montre que la méthode n'induit pas de biais significatif dans

l'estimation des coefficients ψ et χ .

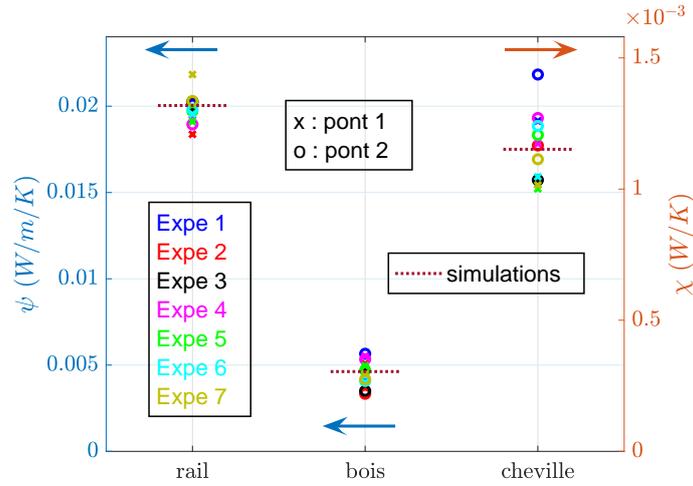


Figure 6: Résultats d'estimation des coefficients de transmission des ponts. Le coefficient est calculé à deux endroits différents pour chaque pont et pour chacune des 7 expériences (la salle, l'orientation de la maquette et la puissance de chauffe sont variées). Comparaison avec les simulations numériques

	Unité	Mesure	Dispersion (%)	Simulation	Ecart relatif (%)
ψ_{rail}	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0.0198	4.1	0.0200	-0.9
ψ_{bois}	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0.0045	15.8	0.0046	-1.2
$\chi_{cheville}$	$W.K^{-1}$	0.0011	11.2	0.0012	-0.4

Tableau 1: Résultats détaillés d'estimation de coefficients des ponts thermiques (valeurs moyennes sur plusieurs mesures). Comparaison avec les simulations numériques

4.2. Incertitudes de mesure

Les incertitudes de mesure sur le coefficient ψ (et similairement sur χ) ont été calculées par l'équation de propagation où le coefficient ψ est fonction de n paramètres β_1 à β_n :

$$u(\psi) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \psi}{\partial \beta_i} \cdot u(\beta_i) \right)^2} \quad (11)$$

La contribution de chaque paramètre sur l'incertitude est détaillée afin d'identifier les plus grandes sources d'erreur. Le facteur de transmission ψ est calculé à partir de trois grandeurs : L_{tb} , U_{1D} , et I_{tb} (voir équation 6). Chacune de ces grandeurs dépend elle-même de plusieurs paramètres. Le tableau 2 présente l'ensemble des quantités utilisées dans le calcul de ψ . Les valeurs nominales et les incertitudes sur chacun des paramètres sont indiquées. On considère ici l'exemple du rail métallique. La largeur L_{tb} du pont thermique considéré est définie par :

$$L_{tb} = N_p \times \frac{L_{ref}}{N_{ref}} \quad (12)$$

où N_p est le nombre de pixels sur l'image thermique. Un élément de longueur L_{ref} connue est disposé dans le champ de vision de la caméra. Le nombre de pixels N_{ref} correspondant permet de définir la résolution spatiale de l'image. Enfin, la répartition des incertitudes, détaillée sur la figure 7, permet d'identifier les plus grandes sources d'incertitudes.

$\psi = L_{tb}U_{1D}(I_{tb} - 1)$		
L_{tb} : Eq 12	U_{1D} : Eq 1 et 2	I_{tb} : Eq 10
$L_{ref} = 1200 \pm 1\text{mm}$	$\psi_{stat} = 11.7\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \pm 3\%$	$\Delta T_{tb}^{app} = 0.9 \pm 0.02^\circ\text{C}$
$N_{ref} = 230 \pm 3$	$\Delta T_{stat} = 31.4 \pm 0.5^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1D}^{app} = 0.5 \pm 0.02^\circ\text{C}$
$N_p = 40 \pm 1$	$R_{gypse} = 0.056\text{ SI} \pm 10\%$	

Tableau 2: *Données d'entrée du calcul d'incertitudes sur ψ : rappel des équations, ainsi que les valeurs nominales (sur l'exemple du rail métallique) et incertitudes de chaque paramètre*

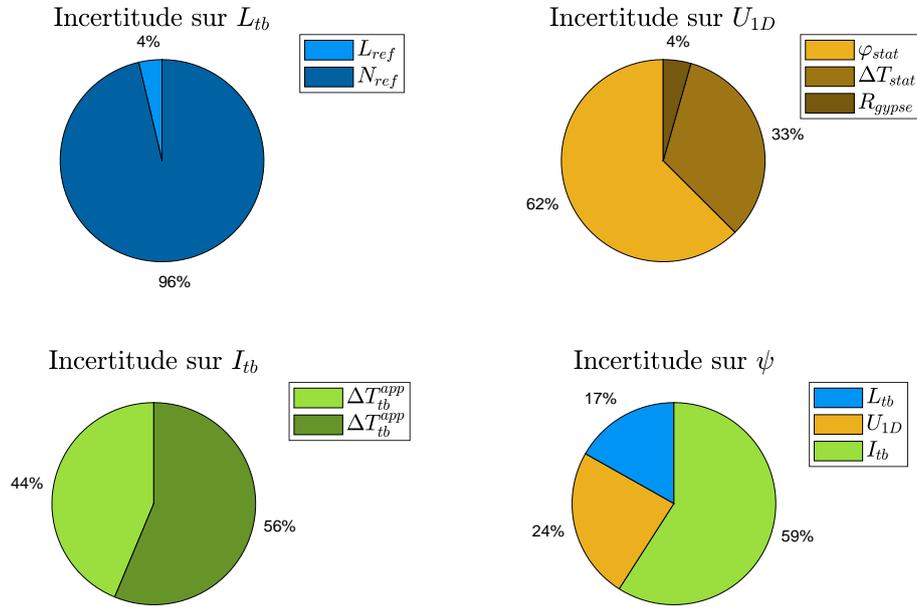


Figure 7: *Contribution relative de chaque grandeur dans le calcul d'incertitude sur ψ . Pour une grandeur Y fonction de paramètres β_i , la contribution de chaque paramètre à l'incertitude sur Y est donnée par : $\left| \frac{\partial \psi}{\partial \beta_i} \cdot u(\beta_i) \right|$*

On observe que la majeure partie de l'incertitude sur la mesure de ψ provient du calcul du facteur d'impact I_{tb} et donc des images thermiques. Une erreur sur L_{tb} ou U_{1D} est moins impactante sur la mesure de ψ . Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus grâce à l'emploi d'une caméra thermique refroidie. L'utilisation d'une caméra à micro-bolomètres diminuerait le rapport signal sur bruit des images thermiques et augmenterait les incertitudes de mesure.

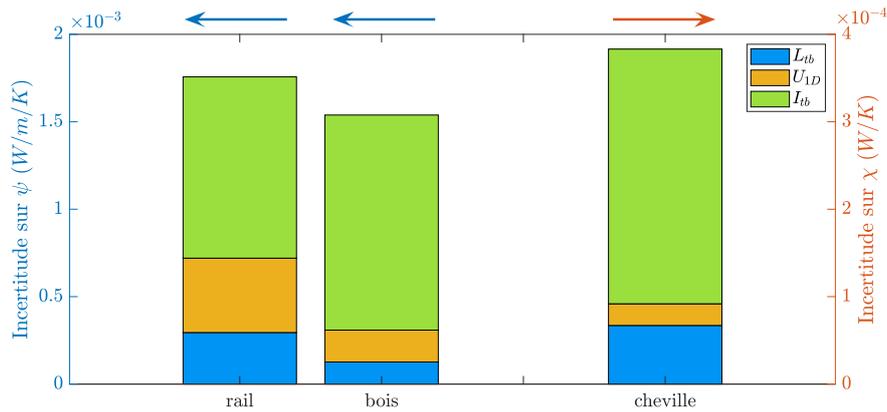


Figure 8: Incertitudes de mesure sur les coefficients de transmission des ponts thermiques. La contribution des paramètres L_{tb} , U_{1D} et I_{tb} est détaillée

5. Conclusion

Dans le cas des ponts thermiques intégrés, la thermographie infrarouge peut être utilisée comme outil de quantification. En régime stationnaire, les images thermiques permettent de calculer un facteur d'impact des ponts I_{tb} qui est un rapport de flux thermiques. L'approche proposée ici s'affranchit de la connaissance de l'émissivité de la paroi en calculant le facteur I_{tb} uniquement à partir des températures apparentes mesurées par thermographie. Les coefficients de transmission linéique et ponctuel ψ et χ sont ensuite calculés. Les mesures réalisées sur une maquette de laboratoire montrent que la méthode est répétable et précise : un écart de seulement 2% a été observé par rapport aux résultats de simulations numériques. L'incertitude de mesure relative est au maximum de 30%. Cette valeur peut paraître importante mais est expliquée par les très faibles valeurs des coefficients ψ et χ sur les ponts étudiés ($0.0045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $0.0011 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ pour les valeurs les plus faibles). Enfin, les données extraites des images thermiques ont été identifiées comme les plus grandes sources d'incertitude. L'étude présentée ici n'a pas vocation à être appliquée in-situ. Les valeurs déterminées ici serviront de références pour le calcul des déperditions dans les ponts thermiques des méthodes en régime transitoire actuellement en cours de développement.

Références

- [1] T. Theodosiou and A. Papadopoulos, "The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 0, pp. 2083–2089, 2008.
- [2] S. Farkh, "Les ponts thermiques dans le bâtiment – Mieux les connaître pour mieux les traiter," tech. rep., Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2014.
- [3] F. Asdrubali, G. Baldinelli, and F. Bianchi, "A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings," *Applied Energy*, vol. 97, no. 0, pp. 365–73, 2012.
- [4] C. Multiphysics, "Comsol multiphysics user guide (version 4.3 a)," *COMSOL, AB*, pp. 39–40, 2012.