

Vers une valeur transitoire du coefficient de pont thermique ψ ?

Towards a transient value of the thermal bridging coefficient ψ ?

Edouard Walther^{*1,2}, Marie-Hélène Azam^{1,2}, Maxime Arenas-Leurent¹

¹INSA Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire
67000 Strasbourg (France)

² Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, CNRS, ICube Laboratory UMR 7357
Strasbourg, France ^{*}(Corresponding author: edouard.walther@insa-strasbourg.fr)

Résumé - Les bâtiments actuels possèdent un niveau d'isolation des parois qui fait ressortir la contribution relative des ponts thermiques sur les déperditions et les apports. Le coefficient ψ [W/m/K] de pont thermique calculé en régime permanent est couramment utilisé pour intégrer la contribution en flux au bilan d'une zone. Dans ce travail, on teste le clustering pour remplacer la valeur standard et constante du ψ par quelques valeurs représentatives des variations annuelles du coefficient.

Abstract - Today's buildings have a level of wall insulation that highlights the relative contribution of thermal bridges to heat loss and gain. The ψ [W/m/K] steady-state thermal bridge coefficient is commonly used to integrate this flux contribution to the energy budget of a zone. In this work, we test clustering approach to replace the standard and constant ψ value with 4 transient values representative of annual variations.

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

| | | | |
|-----------------------|---|-----------------------------|---|
| L | longueur de pont thermique, m | ΔT | écart de température intérieur-extérieur, K |
| h | coefficient d'échange surfacique, W/m ² /K | ϕ_{1D} | flux dans une dimension, W |
| <i>Symboles grecs</i> | | ϕ_{2D} | flux en deux dimensions, W |
| ψ | coefficient de pont thermique, W/m/K | <i>Indices et exposants</i> | |
| λ | conductivité thermique, W/m/K | w | wall |
| ρ | masse volumique, kg/m ³ | PT | pont thermique |
| C_p | capacité thermique massique, J/kg/K | i, e | intérieur, extérieur |

1. Introduction

L'augmentation du niveau d'isolation des bâtiments liée aux évolutions réglementaires des 30 dernières années rend prépondérants les phénomènes de pont thermique [1].

Les exigences actuelles environnementales et énergétiques conduisent à la construction de bâtiments neufs de mieux en mieux isolés. Dans ce contexte, les ponts thermiques deviennent un point non négligeable du bilan énergétique des bâtiments. D'après Hua Ge et al. [2], les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 30% des besoins d'un bâtiment performant.

Les modèles de simulation thermique dynamique (STD) de bâtiment actuellement développés se basent sur une modélisation 1D des transferts thermiques dans les parois. Pour intégrer de manière rigoureuse les ponts thermiques une modélisation 3D de l'enveloppe du bâtiment serait

nécessaire. Cette option n'est actuellement pas développée dans les logiciels de STD à l'échelle d'un bâtiment car très coûteuse en temps de calcul.

Les ponts thermiques ne pouvant pas être modélisés directement, ils sont souvent intégrés à l'aide d'un coefficient noté ψ linéique ou ponctuel [3]. Afin d'éviter un calcul fastidieux, le flux perdu par les ponts thermiques est intégré dans le bilan énergétique d'un bâtiment grâce à cette équation :

$$\phi_{PT} = \psi \cdot \Delta T \cdot L_{PT} \quad (1)$$

et pour cela le coefficient ψ , est calculé en régime permanent grâce à la différence entre le flux bidimensionnel ϕ_{2D} dans la configuration géométrique étudiée et le flux 1D sur une géométrie plane.

$$\psi = \frac{\phi_{2D} - \phi_{1D}}{L \cdot \Delta T} \text{ [W/m/K]} \quad (2)$$

Ce coefficient est le résultat de l'utilisation d'un modèle de paroi équivalente. Il simplifie de manière significative le problème, sous-estimant donc l'impact des ponts thermiques sur le bilan énergétique.

On propose ici d'explorer une piste intermédiaire entre la stratégie 1D et 3D, en calculant un coefficient $\psi(t)$ transitoire qui pourra ensuite être intégré au bilan énergétique d'un bâtiment. Afin d'optimiser la méthode, nous proposons de tester la saisonnalité de ce coefficient à l'aide d'une méthode de *clustering*. Celle-ci a déjà montré ses performances dans d'autres contextes [4, 5] et pourrait permettre d'obtenir une valeur saisonnière de coefficient ψ . Cette nouvelle approche permettrait d'améliorer la précision du bilan énergétique du bâtiment tout en maîtrisant les temps de simulation.

2. État de l'art

Afin d'évaluer de manière précise les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques, plusieurs méthodes ont été développées avec différents degrés de complexité et de coûts de calcul. L'approche la plus répandue consiste à utiliser un modèle de pont thermique en régime permanent, soit en utilisant une majoration forfaitaire des coefficients de transmission thermique des parois, soit, comme présenté en introduction, en calculant un coefficient ψ . Ces approches permettent d'obtenir des estimations approximatives en intégrant simplement la contribution des ponts thermiques aux déperditions globales du bâtiment. Cependant, comme le présente [6], une modélisation dynamique des ponts thermiques serait préférable pour évaluer les consommations (chauffage ou climatisation) proches de la réalité. C'est pourquoi plusieurs approches ont été développées utilisant des modèles 2D ou 3D de modélisation des ponts thermiques basés sur des méthodes de résolution classiques (différences finies, volumes finis), des modèles simplifiés (résistance-capacité) et des modèles réduits. Ces modèles peuvent être ensuite couplés à des logiciels de simulation à l'échelle du bâtiment [2]. Bien que ces approches permettent d'améliorer significativement les résultats, elles ont encore un coût de calcul prohibitif.

La méthode envisagée ici propose un mi-chemin entre un coefficient ψ constant et un modèle 3D détaillé et couplé à un modèle de bâtiment. On propose ici d'explorer le caractère saisonnier d'un coefficient $\psi(t)$ calculé en régime transitoire, avec l'idée de proposer quelques valeurs représentatives saisonnières, plutôt que d'avoir un coefficient ψ variant à chaque pas de temps de calcul. La méthode de clustering est ici proposée pour sélectionner les valeurs représentatives.

Elle a fait ses preuves pour créer une séquence climatique représentative d'une année (83 jours au lieu de 365 jours pour une erreur relative de 7%) [4], ainsi que pour créer un jeu de données d'apprentissage pour entraîner un modèle réduit de type POD (*Principal Orthogonal Decomposition*, 24 jours de données nécessaires au lieu de 365 jours pour une réduction totale des temps de calculs de 94%) [5].

3. Méthode

3.1. Cas d'étude

Un pont thermique représenté par une discontinuité d'isolant intérieur au niveau d'un refend a été étudié (voir Figure 1). Les caractéristiques thermophysiques des matériaux tirées de [7] sont regroupées dans le Tableau 1.

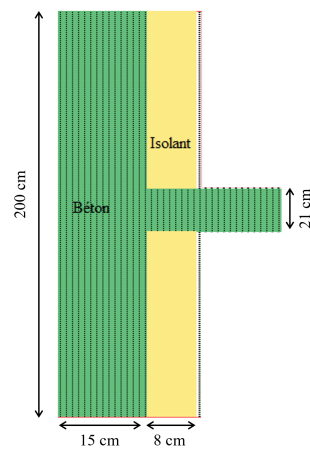


Figure 1 : Composition et dimensions du pont thermique de refend.

| | λ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | ρ kg.m^{-3} | C_p $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
|---------|--|------------------------------|---|
| Isolant | 0.04 | 28 | 1450 |
| Béton | 1.6 | 2200 | 880 |

Table 1 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux

3.2. Problème physique

Le problème physique étudié ici consiste à résoudre l'équation de la chaleur en 2D à l'intérieur d'une coupe de paroi présentant un pont thermique tel que présenté sur la Figure 1. A l'extérieur et à l'intérieur une condition aux limites de Neumann est imposée représentant les échanges superficiels convectif et radiatif linéarisés. On considère des coefficients d'échange surfaciques constants, à l'extérieur $h_e = 25 \text{ [W/m}^2\text{/K]}$ et à l'intérieur $h_i = 7.7 \text{ [W/m}^2\text{/K]}$, conformément aux valeurs conseillées par la RE2020 pour les parois verticales. La température intérieure est fixée à 19°C . Le champ de température à un instant t est donné sur la Figure 2 b) à titre d'exemple. Les conditions de température extérieure sont celles d'un fichier météorologique de Rennes pour l'année 2023, issue de *Meteostat* et représenté sur la Figure 2 a).

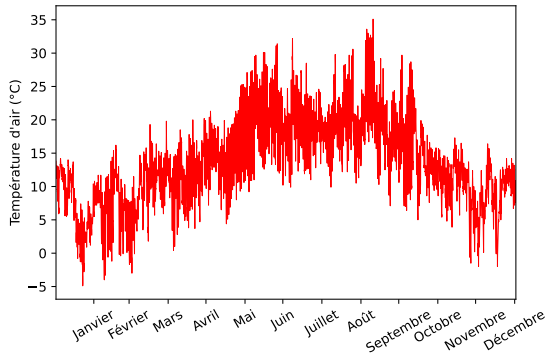


Figure 2 : a) Température d'air extérieur T_e mesurée pour Rennes en 2023 (source Meteo-stat)

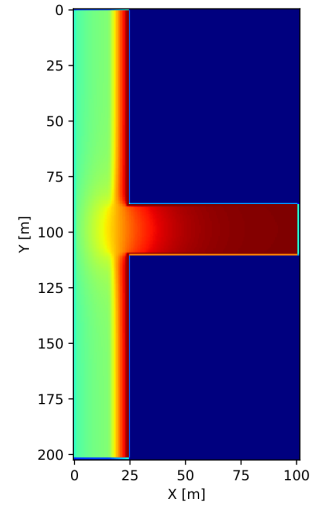


Figure 2 b) : Profil de température dans le pont thermique de refend en ITI avec isolant intérieur.

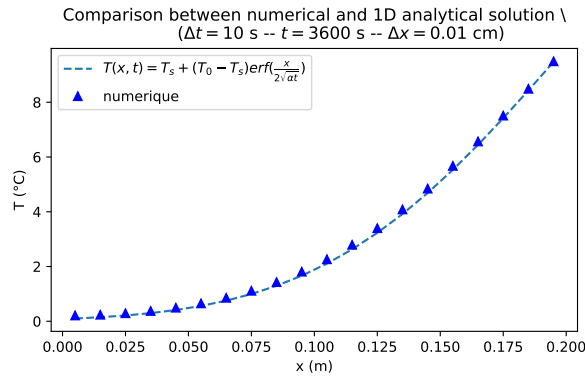


Figure 3 : Comparaison des résultats numériques et analytiques

3.3. Modélisation en volumes finis bidimensionnels

Pour modéliser les transferts de chaleur, la méthode des volumes finis est utilisée [8]. Elle permet, pour une géométrie cartésienne, de récupérer directement les caractéristiques λ, ρ, C_p de la configuration puis de mener les calculs de conduction transitoire avec un schéma d'Euler explicite. La discrétisation temporelle est choisie avec un pas de temps conservateur $\Delta t = 30$ [s] tandis que le pas d'espace $p = 1$ [cm] respecte les recommandations de la réglementation [9], soit $p < 2.5$ [cm] et une taille de domaine supérieure au mètre à partir du pont thermique. Le modèle a été validé sur un cas de massif semi-infini avec température imposée résolu par une solution analytique (voir Figure 3).

3.4. Calcul de la valeur dynamique du pont thermique

Pour chaque pont thermique étudié, on compare à chaque pas de temps les valeurs de flux obtenues $\phi_{1D}(t)$ pour la paroi sans pont thermique *versus* $\phi_{2D}(t)$ pour le modèle complet décrit précédemment afin d'obtenir le coefficient $\psi(t)$ transitoire tel que :

$$\psi(t) = \frac{\phi_{2D}(t) - \phi_{1D}(t)}{L(T_e(t) - T_i)} \quad (3)$$

On obtient alors une valeur de coefficient $\psi(t)$ au pas de temps de calcul sur une année qui constitue notre jeu de données de référence.

3.5. Méthode de clustering

La méthode de *clustering* de données est une stratégie étudiée ici pour sélectionner parmi le jeu de données de référence quelques valeurs représentatives du coefficient de pont thermique transitoire. Le but de cette méthode est de catégoriser des données similaires en groupes/grappes appelés "*clusters*". Chaque groupe peut alors être représenté par un centroïde, qui est le membre central (ou moyen) du groupe. De nombreux algorithmes de partitionnement de données ont été proposés dans la littérature. Nous utilisons la méthode des *k-means* et l'algorithme fourni par la bibliothèque `scikit-learn` de Python [10] qui utilise l'algorithme de Lloyd. Les performances de l'algorithme du *k-means* dépendent de deux paramètres : le point de départ et le nombre de clusters. Différents points de départ choisis aléatoirement peuvent être utilisés pour tester l'algorithme et surmonter le premier problème, pour le deuxième problème plusieurs nombres de clusters ont été envisagés et testés.

3.6. Méthode d'évaluation

L'objectif principal de ce travail est de proposer un nombre réduit de valeurs de coefficient transitoire de pont thermique *via* la méthode de clustering présentée précédemment. Pour cela, le modèle 2D de parois constitue notre jeu de donnée de référence. Trois stratégies sont comparées (1) la valeur réglementaire constante, (2) la valeur transitoire issue du modèle 2D (référence), (3) la valeur saisonnière issue du clustering. Les flux thermiques calculés à l'aide de ces trois méthodes sont comparés par la suite avec pour référence le modèle 2D.

4. Résultats

4.1. Valeurs du coefficient ψ transitoire 2D

Les calculs sont menés pour la géométrie de pont thermique décrite ci-avant. Les distributions des valeurs obtenues pour le refend en ITI sont représentées sur la Figure 6. On constate d'une part que la distribution est centrée autour d'une valeur proche de zéro et qu'il existe des valeurs de coefficient de pont thermique négatives et positives. Au vu de ces résultats, la question de la pertinence d'un coefficient $\psi = cste$ pour l'évaluation annuelle du flux perdu (ou gagné) par les ponts thermiques se pose.

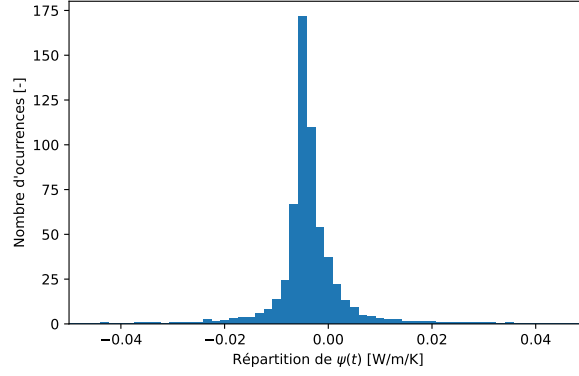


Figure 4 : *Refend* - répartition de $\psi(t)$.

4.2. Clustering des valeurs de $\psi(t)$ et comparaison des méthodes

Afin de représenter le jeu de données $\psi(t)$ par un nombre limité de valeurs, la méthode des *k-means* vise à choisir les valeurs qui minimisent l'écart statistique entre les différentes valeurs d'une série. Il s'agit donc de déterminer combien de valeurs moyennes ψ_i sont à choisir.

La racine de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) servira d'indicateur de comparaison. Elle est calculée comme la différence entre la solution numérique de référence fournie par le flux transitoire lié au pont thermique $\phi_{2D}(t) - \phi_{1D}(t)$ et respectivement le flux calculé par la méthode des *k-means* ainsi que celle du coefficient ψ constant.

La RMSE obtenue en fonction du nombre de clusters choisis est tracée sur la Figure 5, comparée à la RMSE de la méthode classique $\psi = cst$ (en pointillés). On constate que la méthode proposée est systématiquement plus performante que l'usage d'un coefficient de pont thermique constant, ainsi qu'une nette amélioration des performances la méthode pour un nombre de clusters supérieur à 10.

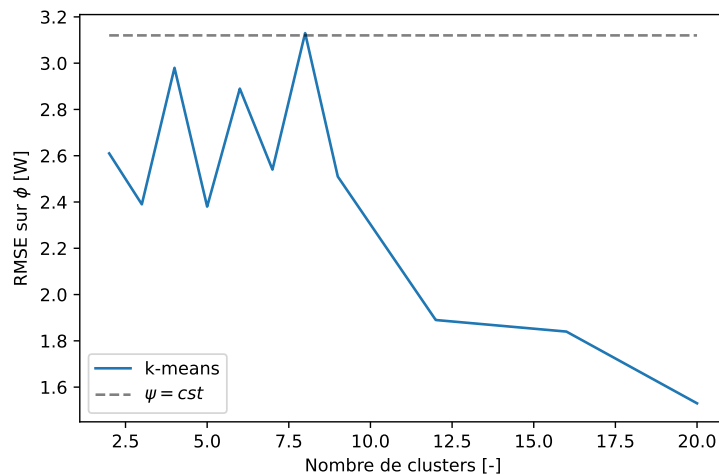


Figure 5 : Comparaison de la racine de l'erreur moyenne quadratique entre $\psi = cst$ et un nombre croissant de clusters.

On présente dans la suite les résultats obtenus pour 10 clusters. Sur la Figure 6 les valeurs

des centres des clusters sont présentées. On observe une dispersion en positif et en négatif avec des valeurs relativement proches, ce qui suggère que la méthode de clustering pourrait être améliorée, notamment en séparant la série en valeurs positives et négatives.

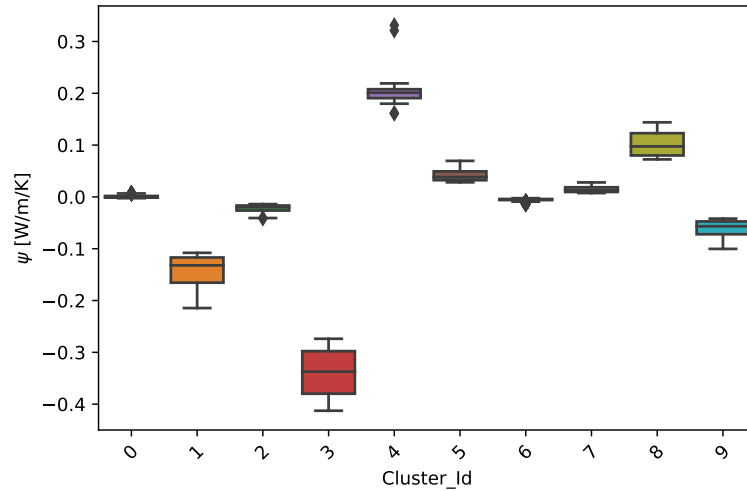


Figure 6 : Boîtes à moustaches des valeurs ψ_i obtenues pour 10 clusters (pour chaque boîte colorée, la barre centrale représente la médiane, et les barres supérieures/inférieures les premiers et derniers quartiles)

Phénoménologiquement, si l'on compare les méthodes avec la solution numérique de référence, on constate que la méthode de clustering est plus à même de représenter les variations de flux passant au travers du pont thermique. Sur la Figure 7, ces flux sont tracés *versus* la solution de référence $\phi_{2D}(t) - \phi_{1D}(t)$ et on observe que la méthode de clustering permet de respecter le sens de variation du flux, avec un coefficient $R^2 \sim 0.75$. La RMSE pour un coefficient de pont thermique constant est de 3.12 [W/m] tandis qu'elle est de 2.67 [W/m] pour la méthode de clustering, soit une réduction de 15%.

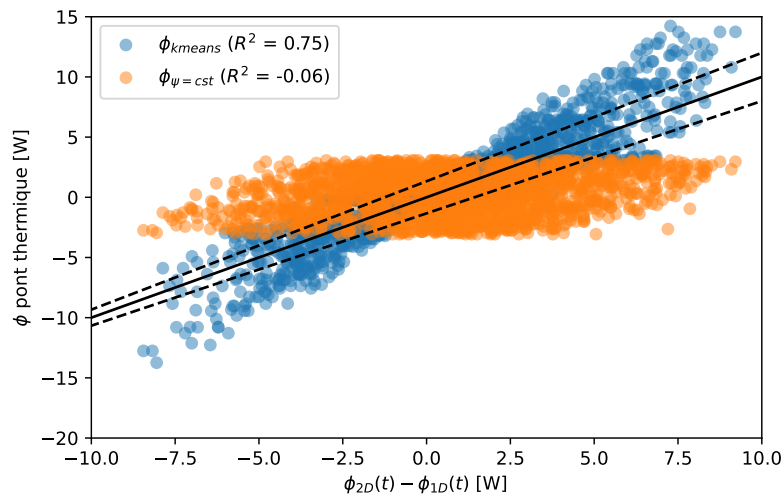


Figure 7 : Comparaison de la méthode $\psi = cst$ et du clustering (10 clusters) avec la solution numérique de référence (les droites continue et en pontillés représentent la première bissectrice $\pm 10\%$)

5. Conclusion

Dans cette étude, une approche originale pour la modélisation des ponts thermiques a été abordée en utilisant une méthode statistique de clustering des données. Elle permet de sélectionner quelques valeurs représentatives au sein d'un jeu de données de pont thermique transitoire. Cette méthode améliore le calcul du flux de pont thermique de 15% par rapport à la méthode 1D et présente une erreur de 2.67 [W/m] par rapport à la solution 2D transitoire, pour un mètre linéaire de pont thermique.

Ces valeurs peuvent sembler modestes mais elles sont bien sûr liées à la typologie du pont thermique choisi et varient sans doute dans d'autres configurations, dont une sélection de ponts thermiques "classiques" qui est en cours d'étude à la suite de ce travail.

Les investigations menées ont ainsi permis de montrer le potentiel de la méthode et ouvrent vers de nombreuses pistes d'investigations comme (1) la mise en relation des températures intérieures et extérieures ainsi que de l'inertie de la géométrie avec la valeur discrète de coefficient de pont thermique, sans quoi la méthode offre peu d'intérêt, ou (2) l'influence significative du flux solaire sur le ψ qui pourra être évaluée par la même méthode sans difficulté.

Cette démarche pourra également être développée dans de futurs travaux sur plusieurs typologies de ponts thermiques (variations de la configuration géométrique et études d'impact de paramètres comme l'épaisseur de l'isolant) pour être ensuite implémentée à une échelle plus large, celle du bâtiment. Ce changement d'échelle permettra de quantifier les bénéfices de la méthode en termes de précision (besoin énergétique ou température intérieure) et de temps de calcul.

References

- [1] Les ponts thermiques dans les bâtiments performants, Mutuelle des Architectes Français assurances, T17, Octobre 2012
- [2] Ge, H., & Baba, F. (2015). Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. *Energy and Buildings*, 105, 106-118.
- [3] Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Kontoleon, K., & Giarma, C. (2021). Assessing the accuracy of predictive thermal bridge heat flow methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110437.
- [4] Ribault, C. (2017). Méthode d'optimisation multicritère pour l'aide à la conception des projets de densification urbaine (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- [5] Azam, M. H., Guernouti, S., Musy, M., & Poullain, P. (2019). How To Perform An Efficient Learning Process For A Combined POD And PGD Soil Urban Thermal Model ? Application To Canyon Streets. In *Building Simulation 2019* (Vol. 16, pp. 3155-3162). IBPSA.
- [6] Roux, J. J., & Kuznik, F. (2024, May). STD: Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D. In *Conférence IBPSA France-La Rochelle Oléron-2024*.
- [7] Réglementation Thermique 2005. Règles Th-U - Fascicule 2 : Matériaux
- [8] E. Walther, *Building Physics – Applications in python*, DIY Spring (2021).
- [9] Règles Th-U - Fascicule 5 : Ponts thermiques - Chapitre II : Méthodes de calcul des ponts thermiques
- [10] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.