



HAL
open science

STD : Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D

Jean-Jacques Roux, Frédéric Kuznik

► To cite this version:

Jean-Jacques Roux, Frédéric Kuznik. STD : Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D. Conférence IBPSA France-La Rochelle Oléron-2024, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) - UMR CNRS 7356, May 2024, Oléron (FR), France. hal-04776591

HAL Id: hal-04776591

<https://hal.science/hal-04776591v1>

Submitted on 11 Nov 2024

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.

STD : Etat de l'art et bon usage des modèles des ponts thermiques et des parois hétérogènes 3D

Jean-Jacques ROUX*¹, Frédéric KUZNIK¹,

¹ **INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, 69621 Villeurbanne, France**

***jean-jacques.roux@insa-lyon.fr**

RESUME : Le niveau d'isolation augmentant, la part des ponts thermiques dans les « déperditions » s'accroît mécaniquement. Les modes de représentation (en régime dynamique) des ponts thermiques classiques mais également des parois hétérogènes (parois « 3D » : plancher sur hourdis, murs en parpaings ...) sont nombreux et souvent d'une mise en œuvre complexe, ce qui limite certainement leur utilisation effective. Nous donnons ici un guide de bons usages de ces différentes méthodes ainsi que leurs limites, leurs intérêts et des exemples d'outils permettant de les générer et ceux permettant de les utiliser.

Après un état de l'art et une analyse bibliographique concernant les différentes approches, nous en détaillons un certain nombre afin de mettre en avant leurs domaines d'application privilégiés (mur équivalent, identification de modèle RC, modèle d'état réduit ...). L'approche que nous avons développée sur la base des logiciels Heat2 et Heat3 (modifié pour nous par leur auteur) complétée d'outils spécifiques (module Matlab) sont décrits dans le détail. Leur utilisation et la mise en œuvre dans des outils de STD sont illustrées sur quelques exemples dans une démarche pédagogique et pragmatique.

MOTS-CLÉS : Ponts thermiques, réduction des modèles d'état, STD, démarche pédagogique et pragmatique

SUMMARY: As the level of insulation increases, heat losses due to thermal bridges increases mechanically. The modes of representation, under dynamic conditions, of conventional thermal bridges but also of heterogeneous walls (3D walls: floor on hedgerows, walls in block blocks, etc.) are numerous and often complex to implement, which certainly limits their practical use. Here we provide a guide to good use of these different methods and their limitations, interests and examples of tools to generate them and those to use them.

After a state of the art and a bibliographical analysis concerning the different approaches, we detail a number of them in order to highlight their preferred fields of application (equivalent wall, identification of RC model, reduced state model ...). The approach that we developed on the basis of the Heat2 and Heat3 softwares (modified for us by their author) supplemented by specific tools (Matlab module) are described in detail. Their use and implementation in STD tools are illustrated in a few examples in an educational and pragmatic approach.

KEYWORDS: Thermal bridges, state model reduction, DTS, pedagogical and pragmatic approach

1. INTRODUCTION

L'objectif de cet article, à caractère pédagogique et pragmatique et qui s'adresse tout autant aux formateurs qu'aux étudiants, est de faire un état des lieux des méthodes permettant la prise en compte des ponts thermiques et des configurations 2D ou 3D (plancher sur hourdis, murs en parpaings, briques ...) dans les outils de Simulation Thermique Dynamique (STD). Les questions concernant ce sujet sont en fait celles de nos étudiants lors des séances d'initiation à la STD intégrées dans nos enseignements : un cours de transferts de chaleur et de masse, suivi d'un cours spécifique de « Thermique du Bâtiment », introductifs à un projet à un projet de STD avec un sujet différent par binôme dans un groupe de TD, les résultats étant présentés lors d'une séance collective. Les questions des étudiants concernant la modélisation sont nombreuses lors de ces projets. Bien évidemment les problématiques importantes abordées dans ce cadre ne sont pas les questions de consommation de chauffage ou d'éventuelle

consommation liée au rafraîchissement en période estivale. En effet la problématique de la consommation E , en régulation parfaite, peut être abordée par le biais du régime permanent à condition de prendre les valeurs moyenne des sollicitations \bar{U} pour la période considérée (Calcul de la consommation E sur une séquence grâce à un modèle d'état : $\dot{X}=WX+BU$, $Y=P(t)=HX+DU$), $E = -HW^{-1}B \int U dt + G \int U dt = (G - HW^{-1}B) \int U dt \Rightarrow (G - HW^{-1}B)\bar{U}=E$.

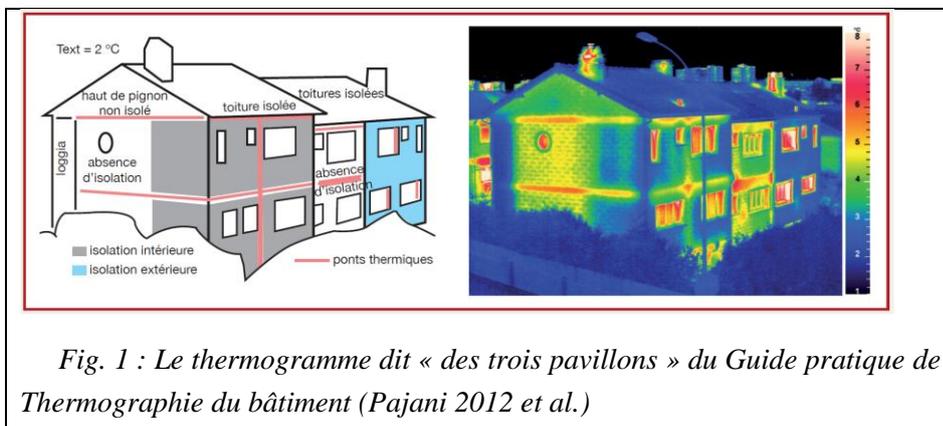
Pour des situations plus réalistes (surchauffes, baisse de la puissance disponible temporellement, ...), (Lefebvre et al. 1985) proposent une corrélation $E=f(\tau,G)$ avec τ : constante de temps principale du bâtiment et G : coefficient de déperdition en $Wm^{-3}K^{-1}$. La sensibilisation à la Thermique du Bâtiment est donc plutôt tournée vers des sujets pour lesquels la STD est indispensable : les gains d'intermittence, le confort, les appels de puissance max., l'inertie, les masques, les vitrages ...

Le sujet de la prise en compte des ponts thermiques en STD ainsi que les parois à fortes hétérogénéités est un des sujets récurrents abordés par les étudiants. Ces derniers ont bien compris que les simulations doivent être faites sur l'année entière (voire plusieurs années) pour être pertinentes (une solution pertinente en hiver est parfois contreproductive en été) et que les codes de STD existants s'ils intègrent des « briques 2D ou 3D », voient alors leur temps de simulation devenir inappropriés.

Alors ... Comment fait-on pour modéliser les ponts thermiques ou les murs en parpaings ?

2. LES PONTS THERMIQUES ET LES PAROIS « HETEROGENES 2D OU 3D »

La figure 1 (Pajani et al. 2012) montre bien l'intérêt de la question posée. Les codes de STD étant basés, sauf « brique » particulière, sur une représentation 1D des transferts de chaleur par conduction dans les parois de l'enveloppe, comment fait-on dans le cas ci-dessous ? L'idée d'une paroi équivalente 1D est a priori très intéressante dans la mesure où celle-ci pourra être intégrée dans tous les codes



existants. Nous allons tenter de décrire, dans les pages suivantes, les différentes approches proposées par de nombreux chercheurs et faire une analyse critique des grandes familles rencontrées.

Mais cette question de la modélisation de ces « parois particulières » en engendre d'autres de la part des étudiants que nous abordons dans une partie liminaire.

2.1. EST-CE BIEN UTILE ? LA PART DES « PONTS THERMIQUES » EST-ELLE SI IMPORTANTE ?

“Studies have shown that in some buildings up to 50% of the elevation area consists of three-dimensional envelope structural details and up to 30% of heating energy can be lost through thermal bridges for well-insulated residential buildings adopting high performance windows and highly insulated walls and roof» : cette citation est extraite de (Hua Ge et al. 2015) et reprend les résultats de (Kosny et al. 1994) et (Theodosiou 2008).

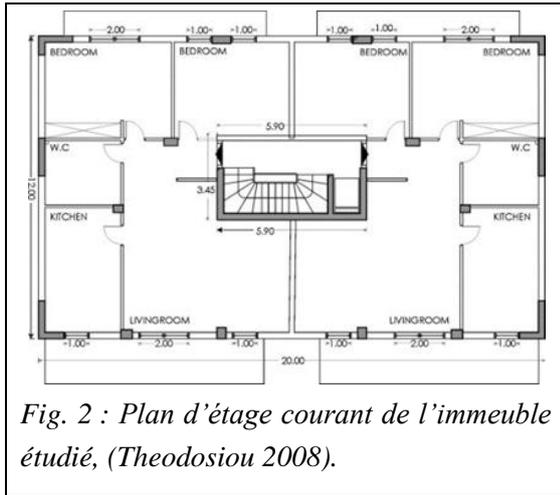


Fig. 2 : Plan d'étage courant de l'immeuble étudié, (Theodosiou 2008).

(Theodosiou 2008) montre un exemple de calcul sur un immeuble de 3 étages (figure 2) de l'écart de consommation de chauffage avec et sans ponts thermiques (figure 3a) ainsi que du maximum d'appel de puissance de chauffage (figure 3b) avec et sans ponts thermiques. Les scénarios A, B, C et D décrivent sur l'exemple du même immeuble des pratiques constructives et d'isolation fréquemment rencontrées en Grèce. Les résultats concernant la prise en compte ou non des ponts thermiques sont probants, que ce soit sur des écarts concernant le calcul de la consommation, aussi bien que sur l'évaluation de la

puissance maximale appelée pour le chauffage. D'autres auteurs (Gao et al. 2008) montrent la même tendance. La prise en compte des ponts thermiques est donc bien une problématique à ne pas sous-estimer.

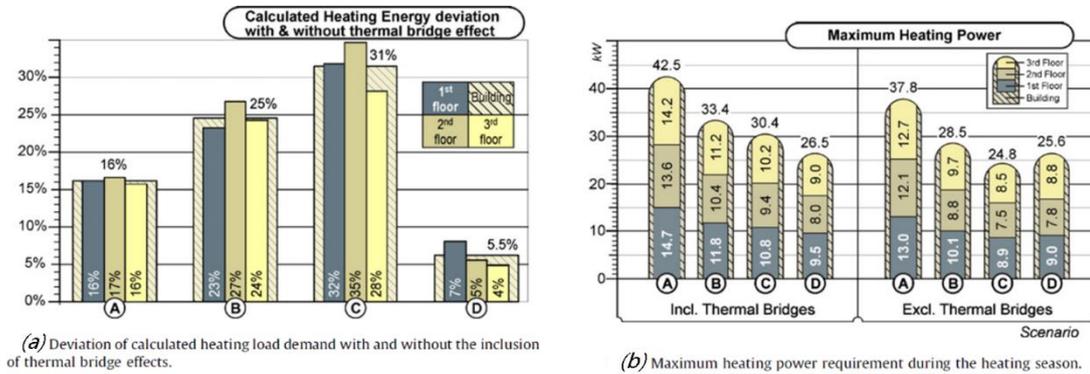


Fig. 3 : Ecarts sur les consommations et sur les appels de puissance maximale (Theodosiou 2008)

2.2. LE MODELE DE « PONTS THERMIQUES » EN REGIME PERMANENT N'EST-IL PAS SUFFISANT POUR LA STD ?

L'article (Déqué et al. 2001a) aborde ce sujet sur l'exemple de la maison Matisse et à l'aide du code de calcul Clim2000. Les modèles de ponts thermiques (obtenus sur la base de modèle d'état réduits) sont générés grâce au code Sysley (maillage structuré par bloc, permettant une économie de mailles) et intégrés dans Clim2000 par le biais de « Types » spécifiques, selon la terminologie utilisée dans le code.

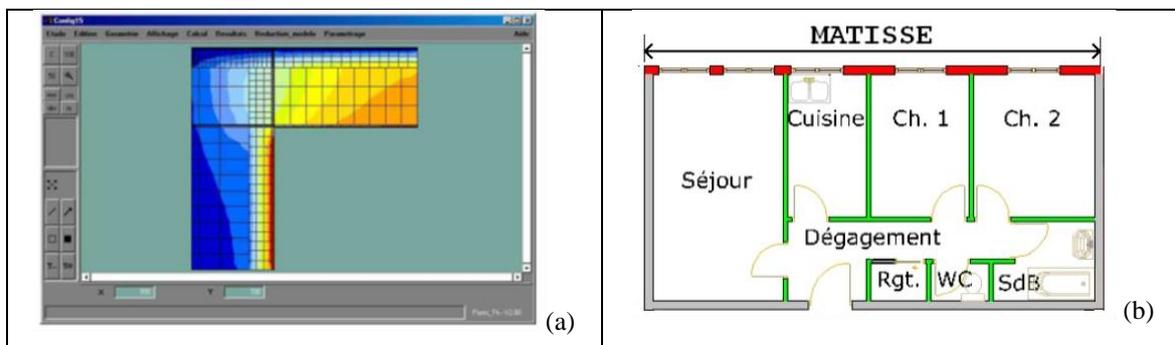
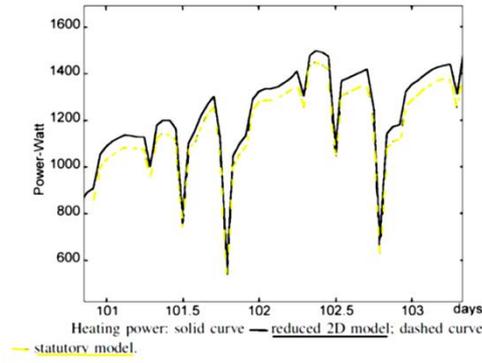


Fig. 4 : Ecran principale du code Sysley (Déqué et al. 2001b) et plan de la maison Matisse (CSTB)



La figure 5 présente les résultats obtenus soit en utilisant les Modèles Réduits Dynamiques (MRD), soit les Modèles en Régime Permanent (MRP) et qui sont ceux de la réglementation thermique.

Les écarts en appel de puissance de chauffage sont compris entre 5 et 7% sur la séquence hivernale traitée, l'approche en régime permanent sous-estimant systématiquement les évaluations de cette puissance.

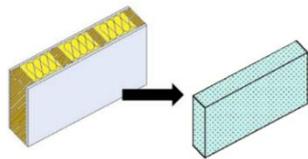
(Ge, 2015) va dans le même sens sur une étude paramétrique incluant les consommations en chauffage et en froid.

Fig. 5 : Comparaison des résultats obtenus avec MRD et MRP (Déqué et al. 2001a)

Des modèles « dynamiques » de ponts thermiques ou de parois hétérogènes semblent donc préférables aussi bien pour l'évaluation des consommations dans des situations « réalistes » que pour les dimensionnements des systèmes de chauffage ou de climatisation.

3. LES DIFFERENTES APPROCHES DE MODELISATION DES PONTS THERMIQUES ET PAROIS HETEROGENES RENCONTREES DANS LA LITTERATURE

3.1. LE MODELE DE PAROI HOMOGENE EQUIVALENTE



(Karambakkam et al. 2005) proposent, pour des parois "composites" relativement simples, de chercher un mur équivalent homogène. La figure 6 ci-dessous résume la méthode et donne les résultats obtenus sur l'un des trois exemples (b) traité dans l'article. La méthode

d'homogénéisation ($R=R_{eq}$ et $C=\rho c_{eq}=\sum p_i c_i$) est appliquée soit à l'ensemble de la paroi (c) avec des

résultats plutôt moyens, soit à la partie centrale 2D (b) avec des résultats un peu meilleurs. La référence utilisée ici (a) est fourni par un modèle d'état à 1176 nœuds (ou le modèle réduit d'ordre 10 obtenu par agrégation linéaire) généré par le biais de HEAT2, qui fait l'objet d'une présentation détaillée au paragraphe 3.3.

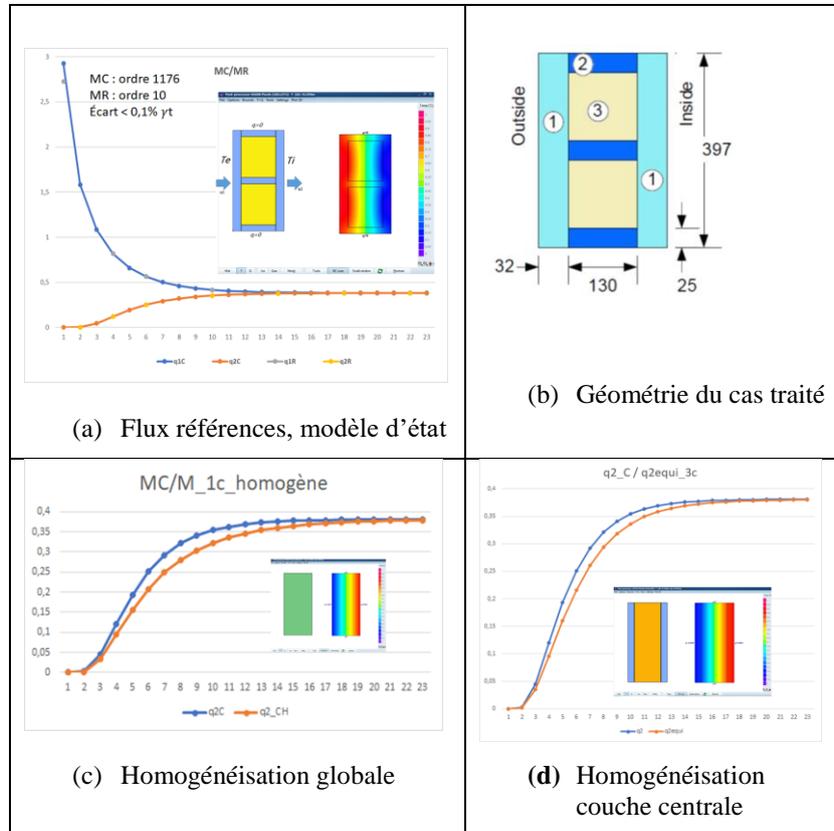
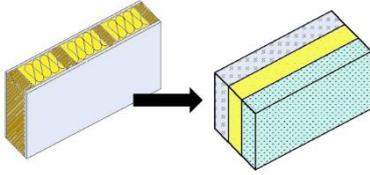


Fig. 6 : Equivalent Homogeneous Layer Method / modèle d'état d'ordre élevé

3.2. LE MODELE DE PAROI MULTI-COUCHES EQUIVALENTE



(Kossecka, Kosny 1997), dont les noms sont indissociables sur ce sujet, ont proposé de rechercher un mur équivalent 1D multicouche équivalent à un pont thermique ou une paroi "hétérogène" en s'appuyant sur les "structure factors" ϕ_{ii} , ϕ_{ee} , et ϕ_{ie} du cas traité (tableau 1). Ces facteurs sont obtenus sur des considérations de conservation de l'énergie pour l'ensemble du volume V traité.

Le rapport de master (F. Baba 2015) ainsi que deux articles (J. Quinten 2016) et (J. Quinten 2019) résument et illustrent parfaitement la méthode ainsi que des variantes.

$\phi_{ii} + 2\phi_{ie} + \phi_{ee} = 1 \quad (a)$ <p>The structure factors can be calculated from the steady-state heat conduction problem with for the following boundary conditions: $T_e = 1$ (unit step) and $T_i = 0$</p> $\phi_{ii} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (1 - T(x, y, z))^2 dV \quad (b)$ $\phi_{ie} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (T(x, y, z))(1 - T(x, y, z)) dV \quad (c)$ $\phi_{ee} = \frac{1}{C} \int_V \rho c (T(x, y, z))^2 dV \quad (d)$ $C = \int_V \rho c dV \quad (e)$	$\phi_{ii} = \frac{1}{R^2 C} \left(C_1 \times \left(\frac{R_1^2}{3} + R_1 \times (R_2 + R_3 + R_e) + (R_2 + R_3 + R_e)^2 \right) + C_2 \times \left(\frac{R_2^2}{3} + R_2 \times (R_3 + R_e) + (R_3 + R_e)^2 \right) + C_3 \times \left(\frac{R_3^2}{3} + R_3 \times R_e + R_e^2 \right) \right) \quad (a')$ $\phi_{ee} = \frac{1}{R^2 C} \left(C_1 \times \left(\frac{R_1^2}{3} + R_1 \times (R_i + R_1) + (R_i + R_1)^2 \right) + C_2 \times \left(\frac{R_2^2}{3} + R_2 \times (R_i + R_1) + (R_i + R_1)^2 \right) + C_3 \times \left(\frac{R_3^2}{3} + R_3 \times (R_i + R_1 + R_2) + (R_i + R_1 + R_2)^2 \right) \right) \quad (b')$ $\phi_{ie} = \frac{1}{R^2 C} \times \left(C_1 \times \left(-\frac{R_1^2}{3} + \frac{R_1 \times R}{2} + R_1 \times (R_2 + R_3 + R_e) \right) + C_2 \times \left(-\frac{R_2^2}{3} + \frac{R_2 \times R}{2} + (R_i + R_1) \times (R_3 + R_e) \right) + C_3 \times \left(-\frac{R_3^2}{3} + \frac{R_3 \times R}{2} + (R_i + R_1 + R_2) \times R_e \right) \right) \quad (c')$ <p>With:</p> $R = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_e \quad (d')$ $C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (e')$ $R_m = \frac{e_m}{k_m} \quad (f')$ $C_m = \rho_m \times c_m \times e_m \quad (g')$
<p>Modèle 3R3C de la paroi équivalente</p>	

Tableau 1 : Détermination des « Structure Factors » (a-e) appliquée sur le volume V du pont thermique ou de la paroi hétérogène et application au modèle 3R3C (a' - g')

J. Quinten, V. Feldheim et F. Baba ont proposé dans un premier temps la résolution des 4 équations à 5 inconnues du tableau 1 par le biais d'une procédure itérative. Les résultats sont souvent corrects mais la solution est non-unique. J. Quinten et V. Feldheim ont donc imaginé la "Méthode mixte" en complétant la méthode précédente par la recherche des R_i et des C_i qui par ailleurs minimisent le critère F ci-dessous. A et α représentent les Amplitude et Déphasage des flux intérieur (i) et extérieur (e) du pont thermique, A' et α' étant ceux obtenus grâce au modèle 3R3C.

$$F = \sqrt{\left(\frac{A_i(24h) - A'_i(24h)}{A_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{A_e(24h) - A'_e(24h)}{A_e(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_i(24h) - \alpha'_i(24h)}{\alpha_i(24h)} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_e(24h) - \alpha'_e(24h)}{\alpha_e(24h)} \right)^2}$$

Le R_m et C_m ($m=1,3$) du modèle 3R3C étant connues, les conductivités des 3 couches sont déterminées en faisant l'hypothèse $e_m = e_{\text{total}}/3$ et les masses volumiques ρ_m en posant $c_m = 1 \text{ kJ}/(\text{kg}/\text{K})$.

La figure 7 ci-dessous résume la "Méthode mixte" (structure factors + réponse en flux à une sollicitation sinusoïdale).

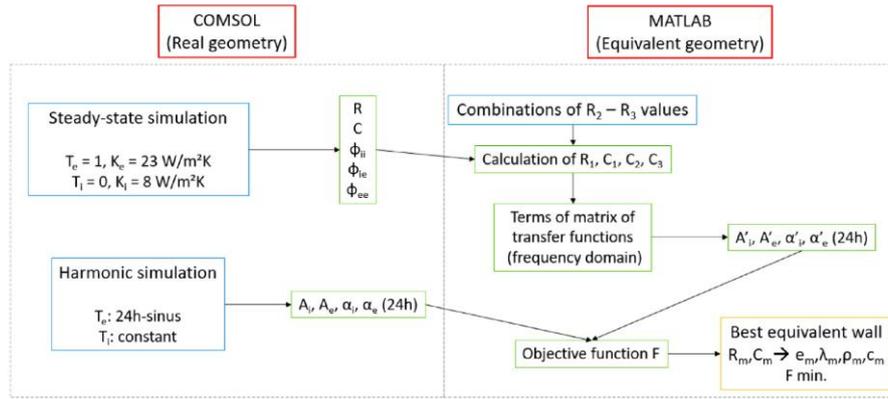


Fig. 7 : Résumé de la « Méthode mixte » (J. Quinten 2019)

L'exemple de la figure 8 ci-dessous montre l'efficacité de la méthode sur l'exemple d'un pont thermique. Deux autres exemples dans cet article donnent des résultats tout aussi convaincants.

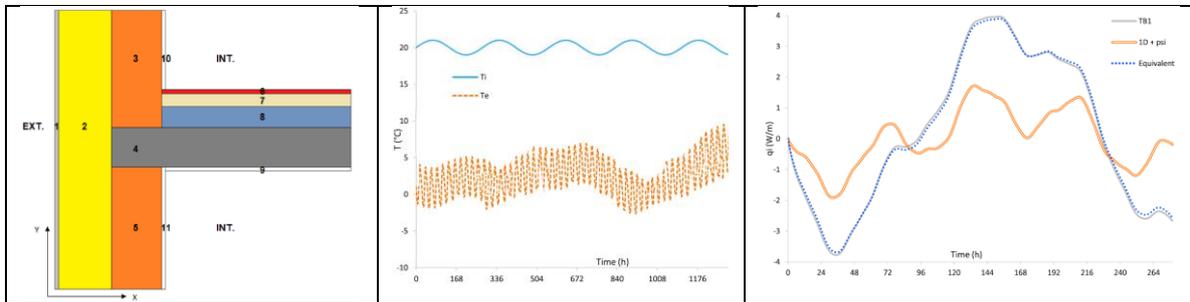


Fig.8 Cas traité (TB1), sollicitations et flux total sur les faces internes du pont thermique

R_1	R_2	R_3	C_1	C_2	C_3
m²K/W			kJ/(m²K)		
0.21	6.29	0.08	631	4.83	17.5
ψ	S_{ref}	ϕ_{ii}	ϕ_{ie}	ϕ_{ee}	F
W/mK	m²/m	-		-	
0.004	1.06	0.92	0.02	0.03	0.032

Tableau 3 : Caractéristiques de la paroi équivalente et du modèle R3C3 associé

J. Quinten et V. Feldheim soulignent eux aussi l'intérêt de la prise en compte des ponts thermiques via un modèle « dynamique » : l'écart avec l'approche « 1D+ Ψ » (courbe orange, figure 8) sous-estime fortement les « pertes /gains » sur cette séquence climatique particulière par rapport aux courbes bleues (référence) et pointillée (mur équivalent). La méthode est très satisfaisante. Outre son excellente capacité de reproduction des pertes/gains en dynamique, le fait qu'elle soit basée sur l'identification d'une paroi 1D

permet d'utiliser celle-ci facilement dans quasiment tous les codes de STD. Néanmoins dans l'exemple de la figure 8, les deux zones séparées par le plancher sont nécessairement à la même température ce qui, très souvent, n'est pas le cas, en particulier dès que l'on souhaite des consignes différentes par zone ou en cas de surchauffes dues aux gains solaires par exemple.

3.3 REDUCTION DES MODELES D'ETAT

Une représentation par un modèle d'état à trois entrées $U(t) = [(Te(t), Ti1(t) \text{ et } Ti2(t))]^t$ et trois sorties $Y(t) = [(Pe(t), \Phi i1(t), \Phi i2(t))]^t$ permet de contourner cette difficulté (Déqué et al. 2001a). Après discrétisation spatiale du cas à traiter et définition des conditions aux limites (Figure 9), il est possible de représenter les transferts de chaleur au travers de la paroi par un modèle d'état, les grandeurs « observées » Y pouvant s'exprimer sous la forme d'une combinaison linéaire de l'état $T(t)$ et des sollicitation $U(t)$: $CT'(t) = AT(t) + BU(t) \text{ et } Y(t) = JT(t) + GU(t)$ (dans la suite nous supprimons la référence au temps t). Ces modèles réduits ont également été validés par rapport à l'expérimentation (Gao 2004) dans des configurations 3D. En diagonalisant la matrice $C^{-1}A$ (dim n, n), on obtient la matrice des valeurs propres W (dim n, n) et des vecteurs propres P (dim n, n).

Le changement de base par $T = PX$ permet d'écrire : $\dot{X} = WX + BU$ et $Y = HX + GU$.

De nombreuses méthodes permettent de réduire la dimension du modèle d'état ($r \ll n$) tout en donnant une bonne estimation des grandeurs observées, la plupart des modes ne contribuant pas ou peu dans leur reconstitution (Gao 2009). La figure 9 ci-dessous résume la procédure que nous avons mis en place avec l'aide de Thomas Blomberg (<https://buildingphysics.com/heat2-3/>) qui a produit des versions spéciales de Heat2 et Heat3 afin de générer automatiquement les modèles d'état correspondant à un cas 2D voire 3D. Les fichiers générés sont traités par une procédure Matlab produisant les modèles d'état réduits.

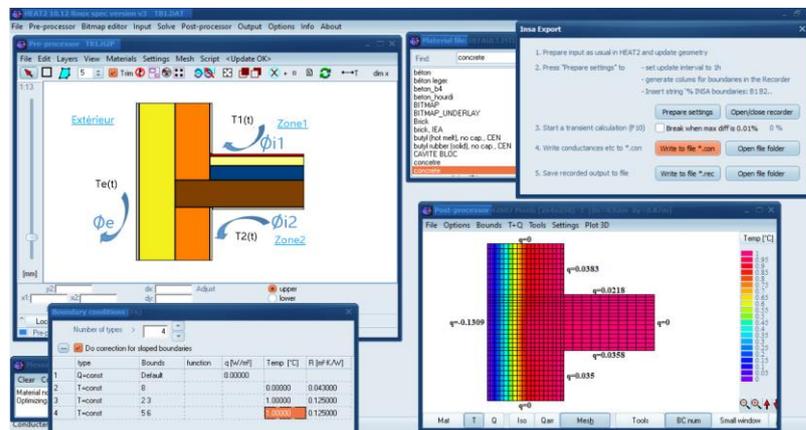


Fig. 9 : Ecrans de saisie de Heat2. Géométrie, conditions aux limites, maillage et génération des fichiers décrivant complètement le cas (voisins/mailles et relation flux aux frontières/sollicitations)

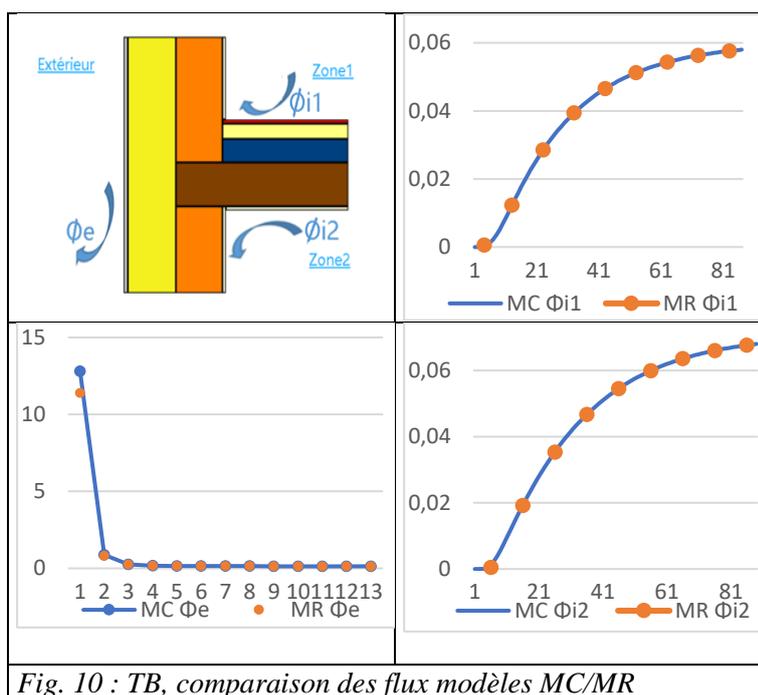


Fig. 10 : TB, comparaison des flux modèles MC/MR

(contrairement à la méthode d'identification d'une paroi 1d équivalente).

4. CONCLUSIONS

D'autres méthode d'identification d'un modèle nRnC ($n=1..6$, généralement) sont également proposées dans la littérature, mais la méthode la plus prometteuse et la plus générale semble être la méthode basée sur les modèles d'état réduits permettant de prendre en compte la présence de locaux adjacents à températures différentes. La contrepartie, en ce qui concerne ce type de méthode, est la nécessité du développement d'un module spécifique au sein du code de STD, contrairement à la méthode

de « paroi équivalente » utilisable, avec ses contraintes, dans tous les codes de STD existants. Les formateurs doivent faire en sorte que les étudiants aient conscience de l'existence de ces méthodes et de la disponibilité de l'une d'entre au moins dans les codes de STD les plus utilisés.

5. BIBLIOGRAPHIE

G. Lefebvre, A. Neveu, 1985, Calcul simplifié de la constante de temps principale d'un bâtiment, Atelier d'Evaluation H2E85

D. Pajani, J.-P. Favre, J.-L. Marty, C. Guillermo, 2012. *Guide pratique de thermographie du bâtiment*, Eyrolles

Hua Ge, Fuad Baba, 2015. *Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building*, Energy and Buildings 105, 106–118

J. Kosny, A.O. Desjarlais, 1994. *Influence of architectural details on the overall thermal performance of residential walls systems*, J. Therm. Insul. Build. Envelopes 18 (1), 53–69.

T.G. Theodosiou, A.M. Papadopoulous, 2008. *The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions*, Energy and Build. 40, 2083–2089.

F. Déqué, F. Ollivier, J.J. Roux, 2001a. *Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings: numerical application on the Matisse apartment*, Energy and Build. 33, 583–587.

F. Déqué, J. Noel, J.-J. Roux, 2001b. *SISLEY: An open tool for transient-state two-dimensional heat transfer*, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil

Y. Gao, J.J. Roux, L.H. Zhao, Y. Jiang, 2008. *Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses*, Energy and Buildings 40, 2236–2243

B.K. Karambakkam, B. Nigusse, J. D. Spitler. 2005. *A One-dimensional Approximation for Transient Multi-dimensional Conduction Heat Transfer in Building Envelopes*. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 1, pp. 340-347.

E. Kossecka, J. Kosny, 1997. *Equivalent wall as a dynamic model of a complex thermal structure*, J. Therm. Insul. Build. Envelopes 20, 249–268.

J. Quinten, V. Feldheim, 2016. *Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method*, Energy and Buildings, Volume 110, 1, Pages 284-293

J. Quinten, V. Feldheim, 2019. *Mixed equivalent wall method for dynamic modelling of thermal bridges: Application to 2-D details of building envelope*, Energy & Buildings 183, 697–712

F. Baba, 2015. *Dynamic Effect of Thermal Bridges on the Energy Performance of Residential Buildings*, Master of Applied Science, Concordia University Montréal, Québec, Canada,

Y. Gao, J.J. Roux, L.H. Zhao, Y. Jiang, 2008. *Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses*, Energy and Buildings 40 (12), 2236-2243

Y.Gao, J.J.Roux, C. Teodosiu, L.H.Zhao. 2004 Reduced linear state model of hollow blocks walls, validation using hot box measurements, Energy and Building, 36(11):1107~1115