

Proposition d'une méthode simplifiée de prise en compte des ponts thermiques dans la simulation dynamique de bâtiments

Julien Quinten*¹, Véronique Feldheim¹

¹ UMONS – Faculté Polytechnique – Service de Thermique et Combustion
Rue de l'Epargne, 56, 7000 Mons (Belgique)

*julien.quinten@umons.ac.be

RESUME. Nous proposons une méthode permettant de tenir compte de manière simple et précise de l'impact des ponts thermiques sur la consommation énergétique des bâtiments dans les logiciels de simulation dynamique. Cette méthode consiste en la détermination d'une structure équivalente 1D à 3 couches qui possède les mêmes caractéristiques statique et dynamique, déterminées à partir de simulations numériques, que le pont thermique qu'elle va remplacer et dont les propriétés sont à encoder dans le logiciel. Cette méthode a été testée sur une structure simple 1D et sur un pont thermique 2D ; dans les deux cas, nous avons constaté que la structure équivalente se comporte de la même façon, thermiquement parlant, que la structure étudiée. Elle est plus efficace (rapidité, précision) que les 2 méthodes dont elle s'inspire.

MOTS-CLÉS : ponts thermiques, simulation énergétique des bâtiments, structure multicouche équivalente.

ABSTRACT. We propose a simple and accurate method to take into account the effects of thermal bridges on the energy consumption in a building using transient simulation programs. This method is based on the determination of a 1D equivalent structure (3 layers) having the same static and dynamic behaviour as the thermal bridge: its properties are then introduced inside the program. This method has been tested on a 1D simple structure and on a 2D thermal bridge: in both cases, the equivalent structure has the same thermal behaviour as the initial structure. It seems to be a more efficient method (speed, accuracy) than those from which it is inspired.

KEYWORDS: thermal bridges, building energy simulation, equivalent multilayer wall.

1. INTRODUCTION

Afin de pouvoir prédire précisément le comportement et la consommation énergétique d'un bâtiment, de manière globale ou ponctuelle, des logiciels de simulation énergétique des bâtiments sont régulièrement utilisés. Au sein de ceux-ci, les effets dynamiques des ponts thermiques (les ponts thermiques peuvent être la cause de 5 à 39% de la demande énergétique des habitations [4]) ne sont généralement pas considérés de façon suffisamment précise et l'évaluation de leur impact sur la performance énergétique du bâtiment ne traduit pas forcément la réalité des phénomènes. Cela peut donc conduire à des imprécisions au niveau des résultats, celles-ci ne sont plus négligeables puisque l'on conçoit des bâtiments dont la consommation énergétique devient de plus en plus faible.

L'objectif est donc de pouvoir disposer d'une méthode simple et précise de prise en compte des effets statique et dynamique des ponts thermiques les plus répandus et les plus significatifs afin de les incorporer dans un logiciel de simulation énergétique des bâtiments.

Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est modifiée de manière sensible. Cela peut être causé par un changement de forme, d'épaisseur ou de matériau dans l'enveloppe. Dans la zone du pont thermique, le flux de chaleur devient bi- ou tridimensionnel (2D ou 3D), alors que dans la zone non perturbée par le pont thermique, il est monodimensionnel (1D).

Il est possible de tenir compte « simplement » des déperditions supplémentaires engendrées par un pont thermique mais généralement pas de considérer les aspects dynamiques des phénomènes.

Pour intégrer les aspects multidimensionnels et dynamiques, on aura recours à des méthodes numériques. Mais à partir du moment où il faut évaluer l'évolution au cours du temps de la température intérieure et des consommations énergétiques d'un bâtiment, cela peut devenir complexe et exiger beaucoup de ressources numériques. Il est alors intéressant de définir un modèle simplifié qui représente correctement la réalité et qui est facile à intégrer dans un logiciel de simulation.

Deux méthodes simples permettent de traiter ce problème indépendamment des conditions aux limites : la méthode de la structure équivalente et celle des coefficients de transfert 3D [3]. Nous avons sélectionné la méthode de la structure équivalente qui fournit des valeurs, valables quel que soit le pas de temps choisi, à encoder directement via l'interface du logiciel de simulation énergétique.

Nous avons étudié (voir [8]) différentes méthodes définissant une structure équivalente ; nous proposons ici une méthode mixte se basant sur deux de ces méthodes. Nous l'appliquons ensuite à une structure simple 1D et à un pont thermique 2D et vérifions la qualité des résultats.

2. LES METHODES DE STRUCTURE EQUIVALENTE

L'idée générale des méthodes dites de « structure équivalente » est de remplacer la partie de l'enveloppe perturbée par le pont thermique, où le flux de chaleur est 2D ou 3D, par une structure multicouche 1D ayant les mêmes comportements thermiques statique et dynamique que la partie réelle. Définir cette structure revient à déterminer la résistance thermique R et la capacité thermique C de chaque couche, et en déduire leur conductibilité thermique λ , leur chaleur massique c , leur masse volumique ρ et leur épaisseur e . Ces propriétés sont ensuite à encoder dans le logiciel de simulation. Le nombre optimal de couches de la structure équivalente serait de 3 [1], une augmentation de ce nombre rendrait la structure plus précise mais augmenterait la difficulté de sa définition. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour générer cette structure équivalente.

Dans la méthode des facteurs de structure [2], 4 relations sont imposées pour définir la structure équivalente alors que 6 paramètres sont à déterminer (les R et C de chacune des 3 couches). Ces paramètres sont alors calculés par une méthode d'essais-erreurs.

Dans la méthode de la matrice des fonctions de transfert [6], après analyse, on se rend compte qu'il s'agit des 4 mêmes relations imposées que dans la méthode des facteurs de structure. En plus, [6] propose 2 relations supplémentaires afin de pouvoir déterminer directement les 6 paramètres. Mais ces 2 relations n'ont pas de sens physique et ne sont pas correctes dans toutes les configurations.

Dans la méthode harmonique [11], on s'attarde à s'assurer que la structure équivalente ait le même comportement, en termes d'amplitude de flux à travers la paroi intérieure, que la structure de base une fois soumise à des conditions aux limites de type harmonique avec différentes périodes.

Dans la méthode par identification [5], la résistance et la capacité de chaque couche sont estimées par un outil d'identification système (ex. : CSTM-R) de manière à ce que l'évolution du flux de chaleur à travers la paroi intérieure, pour des conditions aux limites fixées et variables au cours du temps, soit identique pour la structure de base et pour la structure équivalente. Il faut donner une estimation initiale et un intervalle de valeurs pour chaque paramètre à estimer.

Nous développons ici une méthode qui s'inspire de la méthode des facteurs de structure et de la méthode harmonique. Parmi toutes ces méthodes, c'est la seule qui nous a permis de retrouver directement une structure équivalente (3 couches) à une structure de base 1D à 3 couches qui soit identique à cette structure de base [8].

2.1. LA METHODE PROPOSEE

La structure équivalente 1D doit posséder la même résistance thermique R (m^2K/W), la même capacité thermique C (J/m^2K) et les 3 mêmes facteurs de structure (ϕ_{ii} , ϕ_{ee} , ϕ_{ie} , représentant la fraction de chaleur stockée entre 2 états stables, respectivement à proximité de la surface interne, de la surface externe et du centre de la structure [2]) que la structure réelle étudiée ; ce sont les 5 nombres caractérisant l'état statique et l'état dynamique de la structure. La structure équivalente doit dès lors respecter les conditions imposées par les facteurs de réponse G sur ces facteurs de structure ϕ de la zone étudiée.

Les facteurs de réponse normalisés G_{ii} , G_{ee} et G_{ie} sont des vecteurs et interviennent dans l'expression du flux q_s (W/m^2) à la surface du mur déterminé à partir des températures de surfaces intérieure T_{si} et extérieure T_{se} aux temps présent et précédents (Δ étant la période d'échantillonnage (s)):

$$q_{si}(n\Delta) = \frac{1}{R} \times \left(\sum_{k=0}^{n-1} T_{se}((n-k)\Delta) \times G_{ie}(k) - \sum_{k=0}^{n-1} T_{si}((n-k)\Delta) \times G_{ii}(k) \right) \quad (1)$$

$$q_{se}(n\Delta) = \frac{1}{R} \times \left(\sum_{k=0}^{n-1} T_{si}((n-k)\Delta) \times G_{ie}(k) - \sum_{k=0}^{n-1} T_{se}((n-k)\Delta) \times G_{ee}(k) \right) \quad (2)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} G_{ii}(k) = \sum_{k=0}^{\infty} G_{ie}(k) = \sum_{k=0}^{\infty} G_{ee}(k) = 1 \quad (3)$$

Il est aisé d'obtenir les facteurs de réponse à partir de simulations numériques et des équations 1 et 2. Pour cela, un échelon unitaire d'une des températures de surface (en laissant l'autre à 0, et inversement) peut être préféré à une excitation triangulaire car cette sollicitation est valable quel que soit le pas de temps de la simulation, la durée de l'excitation n'est pas restreinte (représentation correcte des structures massives) et le calcul est plus précis et robuste.

Les facteurs de structure sont liés ensemble par l'équation 4 :

$$\phi_{ii} + \phi_{ee} + 2 \times \phi_{ie} = 1 \quad (4)$$

On peut déterminer les facteurs de structure grâce aux facteurs de réponse normalisés, à partir des équations 5 à 7 :

$$\phi_{ii} = -\frac{\Delta}{R C} \times \sum_{k=1}^{\infty} k \times G_{ii}(k) \quad (5)$$

$$\phi_{ee} = -\frac{\Delta}{R C} \times \sum_{k=1}^{\infty} k \times G_{ee}(k) \quad (6)$$

$$\phi_{ie} = \frac{\Delta}{R C} \times \sum_{k=1}^{\infty} k \times G_{ie}(k) \quad (7)$$

Pour une structure à n couches homogènes planes, leur expression [1] est :

$$\phi_{ii} = \frac{1}{R^2 C} \sum_{m=1}^n C_m \times \left(\frac{R_m^2}{3} + R_m \times R_{m-e} + R_{m-e}^2 \right) \quad (8)$$

$$\phi_{ie} = \frac{1}{R^2 C} \sum_{m=1}^n C_m \times \left(-\frac{R_m^2}{3} + \frac{R_m \times R}{2} + R_{m-e} \times R_{i-m} \right) \quad (9)$$

$$C = \sum_{m=1}^n C_m \quad (10)$$

$$R = \sum_{m=1}^n R_m \quad (11)$$

avec R_m la résistance de la $m^{\text{ème}}$ couche, C_m la capacité de la $m^{\text{ème}}$ couche, R_{m-e} la résistance de la $m^{\text{ème}}$ couche (exclue) à l'extérieur, R_{i-m} la résistance de l'intérieur à la $m^{\text{ème}}$ couche (exclue).

Les facteurs de structure, la capacité totale et la résistance totale de la structure équivalente doivent donc correspondre à ceux de la structure étudiée. Cela peut prendre du temps de générer les facteurs de réponse [2], mais, au final, on ne travaillera qu'avec 5 nombres. Néanmoins, il est nécessaire de rajouter des conditions car nous avons 4 équations (Eq. 8 à 11) et 6 paramètres à définir.

Selon l'analyse de Fourier, les évolutions au cours du temps de la température extérieure et de la température intérieure d'un bâtiment peuvent être décomposées en somme d'harmoniques de différentes périodes et de différentes amplitudes. Il s'avère aussi que les harmoniques les plus significatives sont celles dont la période est de 24h et de 1 an [11].

On va donc appliquer à cette géométrie des conditions aux limites avec une évolution harmonique de la température de surface extérieure, de période P, l'amplitude de cette évolution valant 1, et une température intérieure de 0. On veut que l'amplitude A' et le déphasage, par rapport à T_{se} , φ' du flux q' transmis de la structure équivalente 1D à 3 couches vers l'intérieur soient égaux à ceux (A et φ) du flux q transmis de la structure étudiée, 2D ou 3D, vers l'intérieur, pour la période P définie.

Les caractéristiques du flux q peuvent être déterminées par une simulation numérique. Les caractéristiques du flux q' peuvent être déterminées à partir des équations 12 à 16, dérivées de la théorie de Pipes [7] :

$$\begin{bmatrix} T_{se} \\ q'_{se} \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} T_{si} \\ q'_{si} \end{bmatrix} \text{ avec } M = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} \\ M_{2,1} & M_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ E_3 & D_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ E_2 & D_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ E_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_m = D_m = \cosh \left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}} \right) \quad (13)$$

$$B_m = \sinh \left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}} \right) / \sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times j}{R_m \times P}} \quad (14)$$

$$E_m = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times j}{R_m \times P}} \times \sinh\left(\sqrt{\frac{2 \times \pi \times C_m \times R_m \times j}{P}}\right) \quad (15)$$

Dans les conditions citées et en s'intéressant au flux à travers la surface intérieure, on obtient :

$$q_{si}'(P) = \frac{1}{M_{1,2}} \quad (16)$$

Nous définissons également la fonction d'erreur Err suivante (équation 17) :

$$Err = \frac{|A'(24h) - A(24h)|}{|A(24h)|} + \frac{|\varphi'(24h) - \varphi(24h)|}{|\varphi(24h)|} \quad (17)$$

Nous utilisons un programme implémenté sous Matlab qui, à partir de différentes estimations de R_2 et R_3 , permet d'optimiser leur valeur afin de minimiser, selon la précision choisie, la fonction d'erreur, compte tenu du calcul, à partir des équations 8 à 11, des valeurs de R_1 , C_1 , C_2 et C_3 correspondantes.

3. METHODE APPLIQUEE A UNE STRUCTURE SIMPLE

Nous appliquons la méthode explicitée au point 2 à une structure 1D à 5 couches homogènes et nous recherchons une structure 1D équivalente à 3 couches.

La structure étudiée se compose de l'extérieur vers l'intérieur de : 10 cm de brique ($R = 0.4 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C = 85000 \text{ J/m}^2\text{K}$), une lame d'air peu ventilée de 5 cm ($R = 0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C = 50.2 \text{ J/m}^2\text{K}$), 15 cm d'isolant ($R = 5 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C = 4350 \text{ J/m}^2\text{K}$), 10 cm de béton ($R = 0.125 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C = 180000 \text{ J/m}^2\text{K}$) et 2 cm de plâtre ($R = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C = 26000 \text{ J/m}^2\text{K}$). Nous avons donc un mur présentant une résistance totale de $5.665 \text{ m}^2\text{K/W}$ et une capacité totale de $295400.2 \text{ J/m}^2\text{K}$.

Puisque c'est une structure 1D, nous déterminons ses caractéristiques de manière analytique (Eq. 8, 9 et 12 à 16) : $\phi_{ii} = 0.6805$, $\phi_{ie} = 0.0235$, $A(24h) = 0.0809 \text{ W/m}^2$, $\varphi(24h) = -2.3685 \text{ rad}$.

La structure permettant de respecter les conditions imposées et minimisant suffisamment Err, possède les caractéristiques suivantes, de l'intérieur vers l'extérieur : $R_1 = 0.184 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C_1 = 206165 \text{ J/m}^2\text{K}$, $R_2 = 5.067 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C_2 = 3868 \text{ J/m}^2\text{K}$, $R_3 = 0.414 \text{ m}^2\text{K/W}$, $C_3 = 85367 \text{ J/m}^2\text{K}$. $Err \approx 10^{-5}$.

Nous vérifions, par simulation numérique avec un logiciel aux éléments finis, la qualité de cette structure équivalente. Nous appliquons aux 2 structures des conditions aux limites de Fourier : les évolutions des températures d'ambiances intérieure et extérieure sont reprises sur la Figure 1 et le coefficient de transfert surfacique intérieure vaut $8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ et l'extérieur vaut $23 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

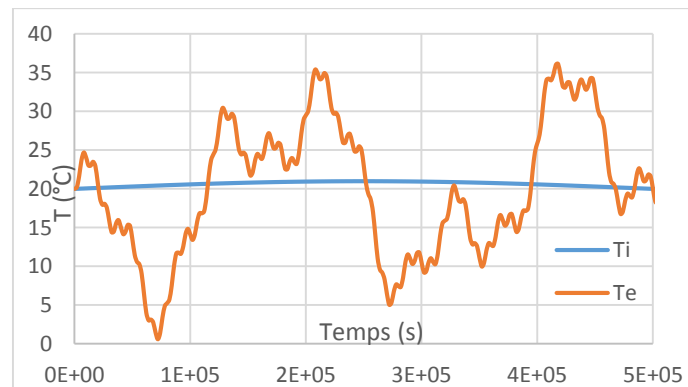


Figure 1 : Evolution des températures d'ambiances intérieure et extérieure au cours du temps

Sur la Figure 2, nous comparons, pour les 2 structures, l'évolution au cours du temps du flux de chaleur transmis au travers de leur surface intérieure (pas de temps = 2000 s). Les 2 courbes se correspondent très bien (l'écart absolu maximal est de 0.037 W/m^2) et la structure équivalente présente le comportement thermique attendu.

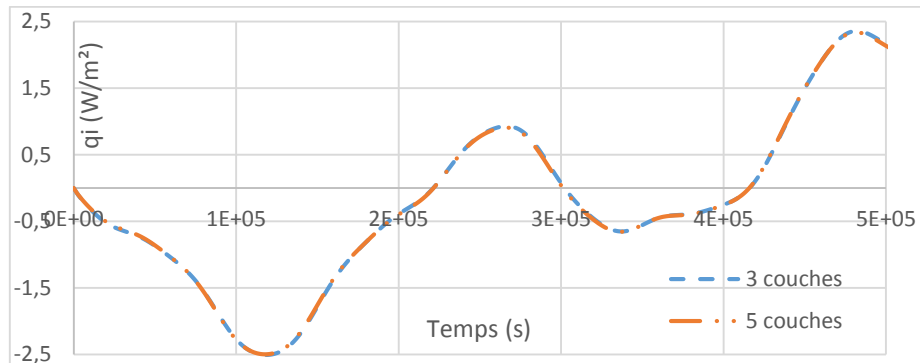


Figure 2 : Evolution du flux transmis à travers la surface intérieure au cours du temps pour la structure étudiée (5 couches) et sa structure équivalente (3 couches)

4. METHODE APPLIQUEE A UN PONT THERMIQUE

Nous appliquons cette méthode à un pont thermique réel (coefficient de déperdition linéique Ψ de 0.004 W/mK) d'un bâtiment passif tiré de la base de données de la Plate-forme Maison Passive en Belgique [10]. Il s'agit d'un raccord entre le mur extérieur et le plancher de l'étage. Sa géométrie est présentée sur la Figure 3 et ses propriétés sont reprises dans le Tableau 1. Les plans coupant la géométrie sont adiabatiques (en bonne approximation en stationnaire).

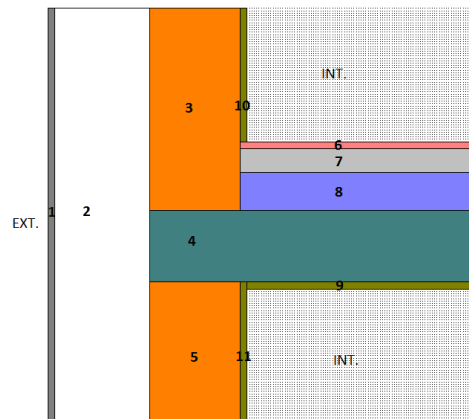


Figure 3 : Géométrie du pont thermique étudié

n°	Matériau	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)
1	Mortier	870	15	0.3	1100	1000
2	PS expansé	870	200	0.034	20	1450
3	Brique	425	190	0.26	850	1000
4	Béton armé	150	705	2.2	2400	1000
5	Brique	295	190	0.26	850	1000
6	Carrelage	15	515	1	2000	1000
7	Béton léger	50	515	0.41	1200	1000
8	Béton	80	515	0.8	1800	1000
9	Plâtre	15	500	0.52	1300	1000
10	Plâtre	280	15	0.52	1300	1000
11	Plâtre	295	15	0.52	1300	1000

Tableau 1 : Propriétés géométriques et physiques des éléments du pont thermique [9] [10]

Les simulations numériques sont réalisées avec un logiciel aux éléments finis. 88768 éléments triangulaires sont utilisés, avec des fonctions de forme quartiques. Le pas de temps est de 500 s pour la détermination des facteurs de réponse (période de simulation : 500000 s) et de 1 s dans la zone d'intérêt pour la simulation avec la sollicitation harmonique.

Nous obtenons les caractéristiques suivantes pour le pont thermique : $\phi_{ii} = 0.9326$, $\phi_{ie} = 0.01805$, $A(24h) = 0.02724$ W/m, $\varphi(24h) = -2.684$ rad, $R = 7.469$ mK/W, $C = 529769$ J/mK (à 0.2% de la valeur réelle). Certaines propriétés doivent être ramenées à une structure 1D d'une hauteur de 0.87 m : $A(24h) = 0.03131$ W/m², $R = 6.498$ m²K/W, $C = 608930$ J/m²K.

La structure équivalente est ensuite déterminée : $R_1 = 0.224$ m²K/W, $C_1 = 587823$ J/m²K, $R_2 = 5.552$ m²K/W, $C_2 = 0.061$ J/m²K, $R_3 = 0.722$ m²K/W, $C_3 = 21108$ J/m²K. Err \approx 5%.

Nous vérifions ensuite la précision par simulation numérique (pas de temps = 2000 s), avec les mêmes conditions aux limites qu'au point 3 (mais en actualisant le coefficient de transfert intérieur de la structure équivalente : $K_i^* = K_i \times \frac{S_{i,pont\ thermique}}{S_{i,structure\ équivalente}}$). De nouveau, les évolutions au cours du temps des flux au travers de la surface intérieure pour les 2 structures (Figure 4) se correspondent bien (écart absolu maximal de 0.075 W/m). A titre de comparaison, nous montrons également cette évolution pour la résolution dynamique du mur extérieur (mortier – PS expansé – brique – plâtre, sur une hauteur de 0.87 m) : au flux calculé, nous ajoutons, comme cela est fait dans TRNSYS, la déperdition supplémentaire due au pont thermique (son inertie propre n'est pas considérée) via la formule suivante :

$$q_i = q_{i,mur\ ext\ 1D} + \Psi \times l \times \Delta T \quad (18)$$

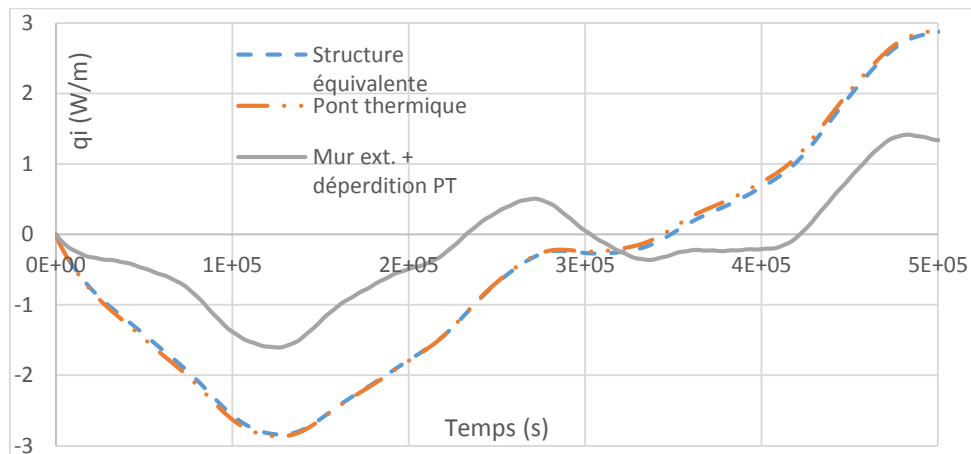


Figure 4 : Evolution du flux transmis à travers la surface intérieure au cours du temps pour le pont thermique étudié, sa structure équivalente et le mur extérieur avec déperdition du pont thermique

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une méthode de détermination d'une structure équivalente 1D à 3 couches qui présente les mêmes comportements thermiques statique et dynamique que des structures plus complexes. Nous avons testé cette méthode sur une structure 1D à 5 couches et sur un pont thermique 2D et les résultats sont concluants : la structure équivalente reproduit avec une très bonne précision le comportement de la structure réelle et ce, pour des sollicitations a priori quelconques. Passer à une structure équivalente à 4 couches n'améliore pas sensiblement les résultats. Pour utiliser la structure équivalente, il est nécessaire d'actualiser les coefficients de transfert surfacique en les

multipliant par le rapport des surfaces correspondantes des structures étudiée et équivalente. Quelques commentaires supplémentaires permettent d'identifier les pistes d'amélioration de cette étude :

Pour la détermination de la structure équivalente, nous avons travaillé avec les températures de surface plutôt qu'avec celles d'ambiance. Nous voulions éviter que les résultats dépendent des coefficients de transfert choisis et cette hypothèse permet également de simplifier les équations 8, 9, 12.

La fonction d'erreur (Eq. 17) peut être étudiée afin d'être améliorée (choix de la période par ex.).

Il faut réaliser 3 simulations numériques différentes (2 échelons - un seul serait suffisant mais nous en conseillons 2, un sur chaque surface, pour vérifier l'équation 4 et la valeur de C - et 1 harmonique) afin d'obtenir les caractéristiques nécessaires de la structure étudiée.

Notons que la méthode n'est pas valable si les propriétés physiques dépendent des températures.

Dans la suite de ce travail, nous désirons développer une procédure simplifiée de génération des structures équivalentes à partir de la réalisation d'une bibliothèque de ponts thermiques en utilisant la méthode proposée dans cet article.

6. BIBLIOGRAPHIE

[1] Carpenter S. 2001. « Advances in modelling thermal bridges in building envelopes ». *Enermodal Engineering Limited*, Kitchener.

[2] Kosny J. et al. 2002. « Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs ». *Energy and Buildings* 34: 445-454.

[3] Kossecka E. et al. 2004. « Two-step procedure for determining three-dimensional conduction Z-transfer function coefficients for complex building envelope assemblies ». *ASHRAE 2004*

[4] Martin. K et al. 2011. « Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions ». *Energy and Buildings* 34: 529-535.

[5] Martin K. et al. 2012. « Equivalent wall method for dynamic characterization of thermal bridges ». *Energy and Buildings* 55: 704-714.

[6] Nagata A. 2005. « A simple method to incorporate thermal bridge effects into dynamic heat load calculation programs ». *IBPSA, Proceedings Building Simulation*: 817-822.

[7] Pipes L. A. 1957. « Matrix analysis of heat transfer problems ». *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 263, No. 3.

[8] Quinten J. et Feldheim V. 2014. « Etude comparative des méthodes simplifiées de prise en compte des ponts thermiques dans la simulation dynamique des bâtiments ». Accepté au *Congrès Français de Thermique 2014*, Lyon (3 au 6 juin 2014).

[9] Région Wallonne. 2009. « Document de référence pour les pertes par transmission ». Annexe VII de la PEB.

[10] Site Internet du Service des Ponts Thermiques de la Plate-forme Maison Passive asbl, <http://www.ponts-thermiques.be>. Date de dernière consultation : 28/02/2014.

[11] Xiaona X. et al. 2007. « Equivalent slabs approach to simulate the thermal performance of thermal bridges in building constructions ». *IBPSA, Proceedings Building Simulation* : 287-293.