

Méthode de mur 1D équivalent : application à des géométries 2D et 3D à 2 ou 3 zones de température – impact sur la performance énergétique d’un bâtiment.

Julien QUINTEN^{1*}, Véronique FELDHEIM¹

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

*(auteur correspondant : julien.quinten@umons.ac.be)

Résumé - Nous rappelons le principe de notre méthode permettant de définir un mur 1D équivalent à une géométrie 2D/3D. Cette méthode est validée, dans des conditions réalistes et variables, sur six ponts thermiques d’une maison à ossature bois énergétiquement performante. La performance énergétique de cette maison est ensuite évaluée en considérant les effets dynamiques des ponts thermiques (via leurs murs équivalents) ou uniquement leurs effets statiques : en tenant compte de leur dynamique, l’impact des ponts thermiques sur les besoins annuels de froid est multiplié par 3 et l’écart de puissance instantanée nécessaire pour atteindre la consigne de température peut atteindre 500-600 W.

Nomenclature

A	surface d’échange, m^2	V	volume, m^3
C	capacité thermique, $J.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
c	chaleur spécifique, $J.K^{-1}.kg^{-1}$	ε	erreur absolue, $W.m^{-1}$
E	erreur relative sur l’intégrale, %	ϕ	facteur de structure
e	épaisseur, m	ψ	déperdition linéique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
g	facteur solaire	ρ	masse volumique, kg/m^3
k	conductibilité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices</i>	
l	longueur, m	dep	déperdition
n_{50}	taux de fuite d’air ($\Delta p = 50 Pa$), h^{-1}	e	extérieur
q	flux de chaleur, $W.m^{-1}$ ou $W.m^{-2}$	i	intérieur
R	résistance thermique, $K.W^{-1}$	int	intégrale
T	température, $^{\circ}C$	moy	moyenne
t	temps, h	pl	plancher (chaque niveau considéré)
U	coefficient de déperdition, $W.m^{-2}.K^{-1}$	w	fenêtre

1. Introduction

Dans la plupart des logiciels de simulation énergétique des bâtiments, une simplification courante est de considérer que le flux de chaleur dû à la conduction dans une paroi est 1D. La contribution statique des ponts thermiques (détails 2D/3D) peut être prise en compte via leur coefficient de déperdition, mais leur contribution dynamique ne peut être modélisée.

Les ponts thermiques pouvant représenter 5 à 39% [1] des pertes de chaleur d’une habitation, une modélisation plus précise des détails 2D/3D s’avère nécessaire pour une évaluation correcte de leur impact. Afin d’éviter une modélisation dynamique 3D intégrée à la simulation du bâtiment, nous avons besoin d’une méthode facile à intégrer dans les logiciels existants pour tenir compte des effets réels des ponts thermiques sur la performance énergétique du bâtiment.

Dans ce cadre-là, nous avons développé une méthode de mur équivalent : le principe est de remplacer le détail 2D/3D par un mur tricouche 1D (Fig. 1) ayant un comportement thermique similaire. Définir ce mur équivalent revient à déterminer la résistance R_m et la capacité C_m de

chaque couche m et en déduire les propriétés physiques (en imposant l'épaisseur e_m et la masse volumique ρ_m , on déduit la conductivité thermique k_m et la chaleur massique c_m).

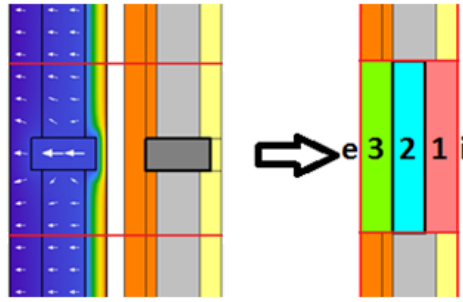


Figure 1 : Principe du mur équivalent

Le principe et les premières analyses de notre méthode sont présentés dans [2-4] : six paramètres sont à déterminer (R_m , C_m avec $m = 1,2,3$) pour définir le mur équivalent qui doit posséder la même résistance totale R , la même capacité totale C et les mêmes facteurs de structure (ϕ_{ii} , ϕ_{ie} et ϕ_{ee}) que la géométrie 2D/3D [5]. Parmi les murs 1D respectant ces conditions, le *meilleur mur équivalent 1D* est celui qui minimise la fonction objectif F (Eq. 1) :

$$F = \sqrt{\sum_{t=400h}^{t=2000h} (q_i(t) - q'_i(t))^2} \quad (1)$$

Cette fonction F compare, à chaque instant, les flux de chaleur à travers la surface intérieure du détail 2D/3D (q_i) et du mur équivalent (q'_i). Ces flux sont calculés par simulation numérique pour le détail 2D/3D et via la matrice de fonctions de transfert dans le domaine fréquentiel pour les murs 1D, dans les conditions suivantes : une température intérieure constante (0) et une température extérieure étant la somme de 9 harmoniques représentatives du climat belge [4].

Dans cet article, nous présentons la suite du travail déjà réalisé. La fonction objectif F a été modifiée en utilisant, désormais, le flux évalué pour une température intérieure sinusoïdale (amplitude unitaire autour de 0, période de 24h) et non plus constante : cela permet de s'assurer que le mur équivalent est capable d'également prendre en compte l'impact des variations de température intérieure sur le flux de chaleur transmis à l'intérieur. Cette fonction objectif a été validée sur les mêmes ponts thermiques que ceux présentés dans [4] et, dans cet article, sur des ponts thermiques d'une habitation à ossature bois.

Nous comparons également, pour l'évaluation des besoins énergétiques de cette habitation, l'utilisation de notre méthode de mur équivalent par rapport à une considération classique des ponts thermiques (via leur coefficient de déperdition ψ).

2. Présentation du bâtiment et des ponts thermiques étudiés

2.1. Bâtiment

Le bâtiment étudié est fictif et ses caractéristiques (voir Table 1) sont celles d'une maison passive à ossature bois (bonne isolation et bonne étanchéité à l'air). Il s'agit d'une maison quatre façades, à un étage. Le flux peut être considéré 1D sur 43% de l'enveloppe extérieure.

V	A_{pl}	A_{dep}	A_w	U_{mur}	U_{toit}	U_{dalle}	U_w	g_w	n_{50}
m^3	m^2	m^2	m^2		$W.m^{-2}.K^{-1}$			-	h^{-1}
558	174	414	27.2	0.175	0.121	0.126	0.57	0.585	0.6

Table 1 : Propriétés principales du bâtiment étudié

Pour la modélisation du bâtiment, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Modèle monozone du bâtiment ;
- Température du sol T_{sol} constante et valant $10^{\circ}C$;
- Portes, cheminées, gouttières, câbles et légère pente de la toiture non considérés ;
- Briques parfaitement jointes ;
- Membranes d'étanchéité non modélisées (pas d'impact thermique) ;
- Les zones d'influence des ponts thermiques sélectionnés (Section 2.2) sont considérées non superposées, comme on peut le voir sur la Fig. 2 :
 - En jaune (a) : pour la jonction toiture plate – mur extérieur ;
 - En bleu (b) : pour la jonction plancher intermédiaire – mur extérieur ;
 - En vert (c) : pour la jonction dalle de sol – mur extérieur ;
 - En rouge (d) : pour la jonction mur extérieur – mur extérieur (coin) ;
 - En blanc (e) : pour la jonction mur intérieur – mur extérieur ;
 - De plus, les fenêtres sont supposées être placées dans les zones de l'enveloppe extérieure non perturbée par d'autres jonctions (zones brunes, f).

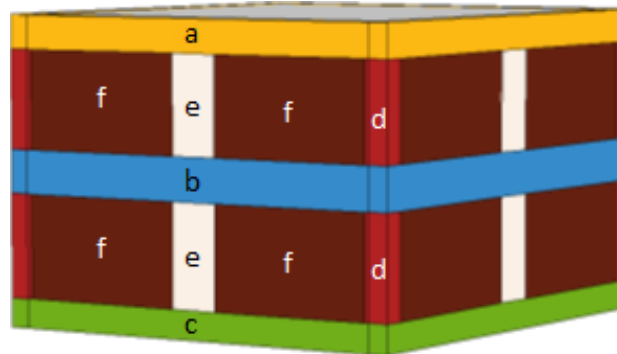


Figure 2 : Zones d'influence considérées des ponts thermiques

2.2. Ponts thermiques

Six ponts thermiques ont été sélectionnés dans le bâtiment présenté (Fig. 4-9) : pour certains, une tranche du détail est étudiée pour tenir compte de l'influence des montants en bois et des solives. Les matériaux les constituant sont repris dans la Fig. 3. Pour chaque pont thermique, leur zone d'influence [3] a été déterminée et elle sera à remplacer par sa structure équivalente.

1	Brique	6	Bois	11	Béton armé
2	Air	7	Plâtre	12	Chape ciment
3	Fibre de bois	8	Béton	13	Béton cellulaire
4	Laine de roche	9	Carrelage	14	PUR
5	OSB	10	Mousse polyoléfine	15	Châssis

Figure 3 : Liste des matériaux

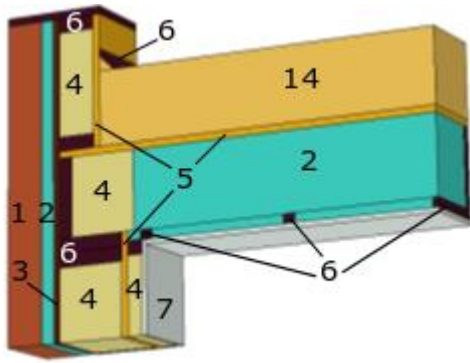


Figure 4 : Toiture – mur ext.

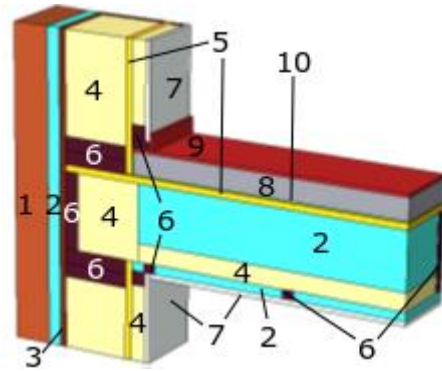


Figure 5 : Plancher int. – mur ext.

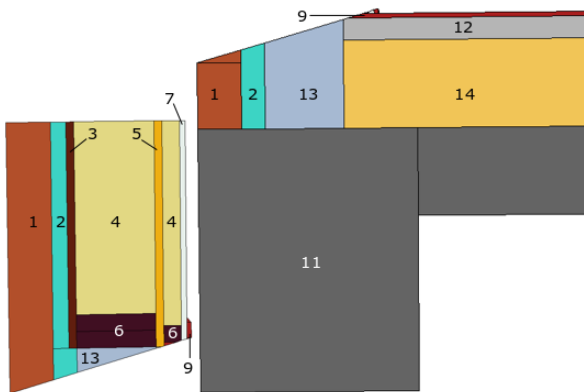


Figure 6 : Dalle – mur ext. (deux parties)

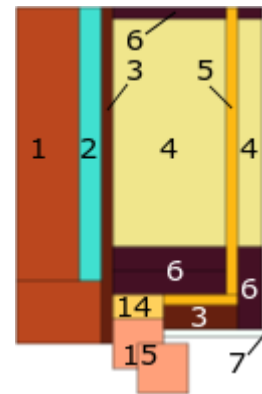


Figure 7 : Châssis – mur ext.

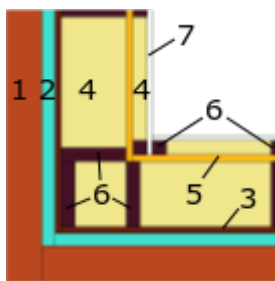


Figure 8 : Coin

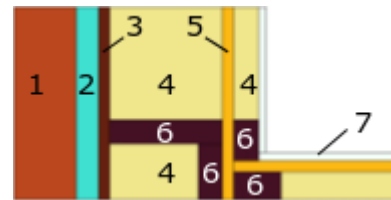


Figure 9 : Mur int. – mur ext. (symétrie)

Les montants en bois répartis dans la couche isolante du mur extérieur créent aussi des ponts thermiques. Une simplification classique est de remplacer cette couche « bois (9.5%) + isolant (90.5%) » par une couche équivalente, ayant des propriétés physiques déterminées en pondérant celles des matériaux par leur volume. Nous avons vérifié que cela conduit à de bons résultats (non présentés ici) et elle a été validée par une autre étude [6]. Cette simplification est donc utilisée pour le mur extérieur de ce bâtiment, sauf dans les zones d'influence d'autres jonctions.

La jonction dalle – mur extérieur est un cas particulier avec trois zones de température (contact avec trois ambiances : T_i , T_e et T_{sol}). Le pont thermique est alors divisé en deux parties (une en contact avec T_i et T_e , l'autre avec T_i et T_{sol}) (Fig. 6) en reprenant la méthode proposée par F. Aguilar [7]. Un mur équivalent est déterminé indépendamment pour chaque partie, les conditions aux limites correspondantes sont appliquées et les contributions des deux parties sont sommées. Pour la partie en contact avec T_i et T_{sol} , les flux utilisés dans la fonction F sont évalués pour une température constante (0) du sol, au lieu d'une somme d'harmoniques.

3. Validation des murs équivalents

La précision de l'évaluation du flux transmis à l'intérieur en utilisant les murs équivalents, déterminés pour les ponts thermiques cités, est étudiée dans les conditions suivantes (Fig. 10) : les données météorologiques horaires d'Uccle (Belgique) et une température intérieure réaliste, tenant compte d'une consigne de chauffage variable, sont utilisées. ($U_i = 1/R_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_e = 1/R_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$ [8], absorption solaire = 0.75, $\Delta t = 1 \text{ h}$).

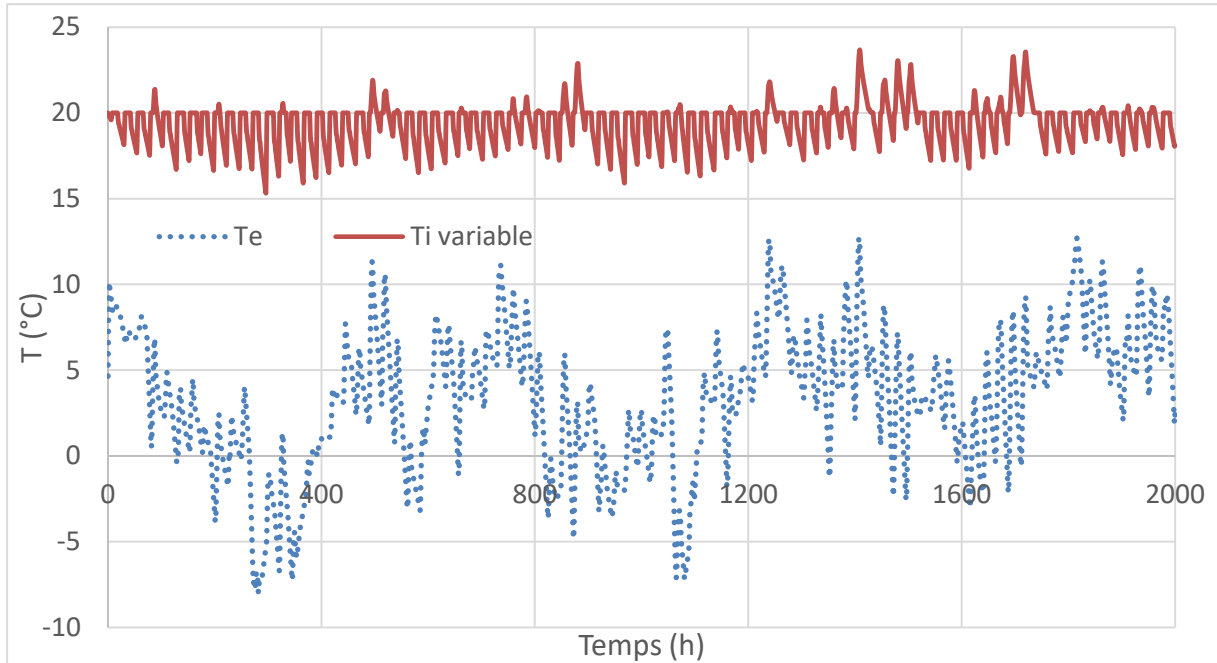


Figure 10 : Températures intérieure et extérieure

La référence est le résultat de la simulation numérique des détails 2D/3D. On la compare avec les résultats obtenus en utilisant les structures équivalentes et ceux relatifs à une évaluation classique (Eq. 2 : le calcul dynamique est réalisé pour la paroi 1D et la contribution statique Ψ du détail est ajoutée). Deux indicateurs sont calculés pour les 2000 premières heures de l'année ($\Delta t = 1 \text{ h}$) : la moyenne de l'erreur absolue sur le flux (ϵ_{moy}) et l'erreur relative sur la valeur de l'intégrale du flux (E_{int}). Les résultats sont repris dans la Table 2.

$$q_{i,classique}(t) \times A = q_{i,1D}(t) \times A + \psi \times l \times (T_e(t) - T_i(t)) \quad (2)$$

	Méthode	E_{int}	ϵ_{moy}	l	$\epsilon_{moy} \cdot l$	ψ
		%	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$	m	W	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Toiture – mur ext. (Fig. 4)	Classique	17	1.48	37.4	55.2	-0.039
	Equivalent	0.01	0.15	37.4	5.4	-
Plancher int. – mur ext. (Fig. 5)	Classique	5.4	4.29	37.4	160	0.044
	Equivalent	0.09	0.13	37.4	4.7	-
Dalle – mur ext. (Fig. 6)	Classique	0.47	1.95	37.4	72.9	0.021
	Equivalent	0.51	0.10	37.4	3.7	-
Châssis – mur ext. (Fig. 7)	Classique	8.9	0.62	68	42.2	0.048
	Equivalent	0.05	0.42	68	28.5	-
Coin (Fig. 8)	Classique	8.4	1.05	16.9	17.7	-0.107
	Equivalent	0.04	0.09	16.9	1.5	-
Mur int. – mur ext. (Fig. 9)	Classique	2.2	0.37	33.8	12.5	0.005
	Equivalent	0.28	0.21	33.8	7.2	-

Table 2 : Comparaison flux : ponts thermiques – mur équivalents

Nous remarquons dans la Table 2 que, pour chaque structure équivalente, l'erreur moyenne sur le flux est inférieure à 0.5 W/m et l'erreur sur l'intégrale du flux atteint au plus 0.5%. L'écart moyen maximal est atteint pour la jonction châssis-mur extérieur. Pour l'évaluation classique du pont thermique, l'erreur moyenne est 1.5 à 35 fois plus importante et l'erreur sur l'intégrale peut atteindre plusieurs pourcents (jusqu'à 17% pour la jonction toiture-mur extérieur). En sommant les erreurs moyennes totales ($\epsilon_{moy.1}$), nous obtenons une valeur d'environ 50 W pour les murs équivalents et de 360 W pour l'évaluation classique. Les résultats sont donc très bons.

4. Simulations énergétiques du bâtiment

4.1. Cas étudiés

La simulation énergétique du bâtiment ($\Delta t = 1h$) est réalisée avec le logiciel TRNSYS 17. Trois approches concernant la modélisation des ponts thermiques sont comparées :

- 1) *SansPT* : L'effet des ponts thermiques est négligé.
- 2) *PTstat* : Seul l'effet stationnaire des ponts thermiques est considéré, via leur coefficient de déperdition linéique ψ . Dans ce cas-ci, la contribution statique totale des ponts thermiques vaut 2.615 W/K.
- 3) *PTdyn* : L'effet dynamique des ponts thermiques est considéré, en remplaçant les zones perturbées (par un pont thermique) par leur structure équivalente.

4.2. Evolution naturelle de la température

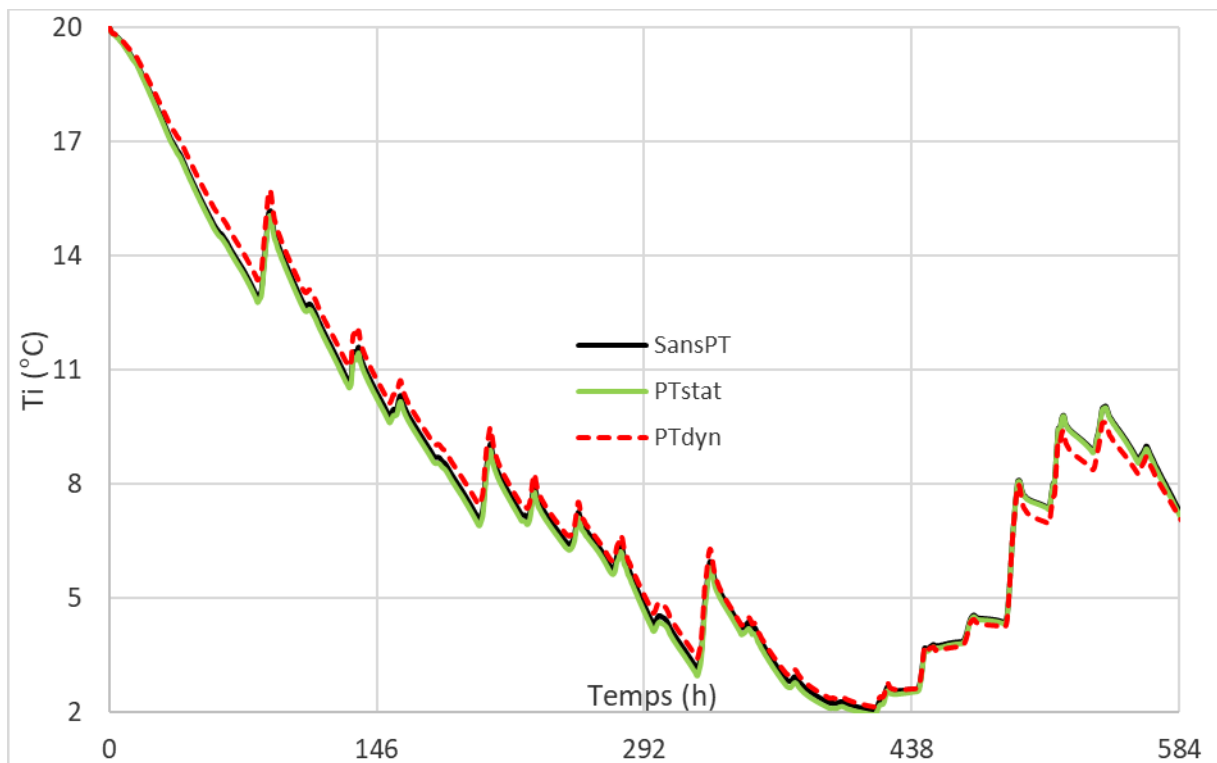


Figure 11 : Evolution temporelle de la température intérieure - trois modèles de ponts thermiques

Une première étude est réalisée sans tenir compte du chauffage, du refroidissement, de la ventilation et des gains internes, afin d'analyser l'évolution naturelle de la température intérieure quand le bâtiment est soumis aux conditions extérieures, pour les trois approches (Fig. 11). La dynamique de cette température pour les cas sans pont thermique et avec ponts thermiques statiques est similaire, avec un écart de l'ordre de 0.2°C. Entre les cas « ponts

thermiques statiques » et « ponts thermiques dynamiques », les variations de température sont un peu moins rapides et importantes pour le cas dynamique (par ex., la pente moyenne sur les 80^{ères} heures est de $-0.08^{\circ}\text{C}/\text{h}$ et cette température est comprise entre 2.1 et 28.8°C durant toute l'année alors que ces valeurs sont de $-0.09^{\circ}\text{C}/\text{h}$ et entre 1.9 et 29.2°C pour le cas statique) : cela correspond à une inertie globale du bâtiment un peu plus élevée en tenant compte de la dynamique des ponts thermiques et une consommation énergétique moins importante pour le chauffage et, surtout, pour le refroidissement est attendue dans ce cas.

4.3. Besoins de chauffage et refroidissement

Afin d'évaluer les besoins énergétiques annuels, la consigne pour le refroidissement a été définie à 25°C et celle pour le chauffage à 20 ou 16°C suivant les périodes du jour. La puissance de chauffe est limitée à 4 kW et celle de refroidissement à 2 kW . Le taux de renouvellement d'air pour la ventilation est fixé à 0.35 h^{-1} (un récupérateur de chaleur est utilisé sans by-pass, son rendement vaut 85%) et les gains internes sont en moyenne de 600 W sur une journée. Des protections solaires sont également utilisées pour limiter la surchauffe.

	<i>Besoins de chauffage</i>			<i>Besoins de refroidissement</i>		
	kWh.m^{-2}			kWh.m^{-2}		
	SansPT	PTstat	PTdyn	SansPT	PTstat	PTdyn
Année	8.66	9.15	9.04	7.75	7.53	7.07
		+5.7%	+4.4%		-2.8%	-8.8%

Table 3 : Besoins annuels en énergie - trois modèles de ponts thermiques

Dans la Table 3, les besoins annuels pour le chauffage et le refroidissement sont repris pour les trois approches. Ils sont assez faibles, en sachant que le label passif impose des besoins annuels inférieurs à 15 kWh/m^2 : ils sont de 8.7 kWh/m^2 pour le chauffage et de 7.8 kWh/m^2 pour le refroidissement (surface utilisée : A_{pl}), pour le cas sans les effets des ponts thermiques. Près de 90% des pertes de chaleur de ce bâtiment se font par transmission et les ponts thermiques augmentent d'environ 5% les besoins annuels de chauffage : les cas statique et dynamique donnent des résultats assez similaires. Par contre, les ponts thermiques diminuent les besoins de refroidissement et leur impact est multiplié par 3 si on tient compte de leur dynamique (-9%), par rapport au cas statique (-3%). Concernant la puissance instantanée nécessaire, des différences de l'ordre de 500 W pour le refroidissement et de 600 W pour le chauffage sont atteintes entre le cas dynamique et le cas statique des ponts thermiques.

4.4. Surchauffe

Afin d'évaluer la surchauffe du bâtiment, les degrés-heures de surchauffe sont calculés par rapport à différentes températures seuils (Table 4) (aucun refroidissement n'étant considéré).

<i>Température seuil</i>	<i>Degrés-heures de surchauffe</i>		
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C.h}$		
	SansPT	PTstat	PTdyn
23	20421	19601 (-4.0%)	18647 (-8.7%)
25	12974	12325 (-5.0%)	11542 (-11.2%)
26	9822	9255 (-5.8%)	8522 (-13.2%)
28	4681	4306 (-8.0%)	3787 (-19.1%)

Table 4 : Degrés-heures de surchauffe - trois modèles de ponts thermiques

La prise en compte des ponts thermiques diminue la surchauffe (de 4 à 8% pour le cas statique, de 9 à 19% pour le cas dynamique, selon le seuil de température). L'impact des ponts thermiques sur la surchauffe est multiplié par un facteur 2 à 2.5 si on considère leur dynamique.

5. Conclusion

Le principe de notre méthode de mur équivalent, pour considérer simplement la dynamique des détails 2D/3D dans les simulations énergétiques, a été rappelé. Le but de cette méthode est de pouvoir améliorer l'évaluation du comportement énergétique de ces détails et donc d'un bâtiment (consommation, surchauffe, confort) ainsi qu'améliorer le dimensionnement de ses systèmes de chauffage/refroidissement. Cette méthode a été adaptée afin de tenir compte correctement de l'impact de variations de température intérieure. Six ponts thermiques d'une maison à ossature bois énergétiquement performante ont été sélectionnés, ils présentent une bonne isolation et une bonne étanchéité à l'air. Leurs murs équivalents ont été validés dans des conditions réalistes : dans chaque cas, l'erreur moyenne sur le flux est inférieure à 0.5 W/m et l'erreur sur l'intégrale du flux ne dépasse pas 0.5%. Une évaluation classique conduit à une erreur sur l'intégrale atteignant jusqu'à 17% et l'erreur moyenne, pondérée par la longueur des ponts thermiques, est 7 fois plus élevée. A noter qu'un cas à trois zones de température a été considéré pour la jonction dalle de sol – mur extérieur : le pont thermique est alors divisé en deux parties et un mur équivalent est déterminé pour chacune d'entre elles.

La performance énergétique de cette maison a été évaluée pour trois cas : sans les effets des ponts thermiques, avec leurs effets statiques et avec leurs effets dynamiques. Sans ces effets, les besoins annuels de chauffage/refroidissement sont respectivement de 8.7 kWh/m² et 7.8 kWh/m². En considérant les effets statiques ou dynamiques, les besoins de chauffage sont augmentés (+5%), puisque les ponts thermiques augmentent les pertes de chaleur, et sont assez similaires. Par contre, l'impact des ponts thermiques sur les besoins de froid est triplé si leur dynamique est considérée (-9%), par rapport au cas statique (-3%), même si cela ne correspond qu'à une différence de 0.46 kWh/m²/an. Ces résultats sont dus à une légère augmentation de l'inertie globale du bâtiment quand on considère la dynamique des ponts thermiques. Entre les cas statique et dynamique, des écarts de puissance instantanée peuvent atteindre environ 500 W pour le refroidissement et 600 W pour le chauffage (25% et 15% de la puissance maximale). Les perspectives de ce travail sont d'étudier d'autres types de ponts thermiques et de bâtiments.

Références

- [1] K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, J.M. Sala, Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions, *Energy and Buildings*, 43 (2011), 529-535.
- [2] J. Quinten, V. Feldheim, Détermination d'un mur 1D équivalent à une structure 2D/3D : analyse de la méthode, *Proc. Congrès Français de Thermique 2015* (La Rochelle, 26-29 mai 2015).
- [3] J. Quinten, V. Feldheim, Détermination d'un mur 1D équivalent à une structure 2D/3D : application à différents ponts thermiques et limites actuelles de la méthode, *Proc. Congrès Français de Thermique 2016* (Toulouse, 31 mai – 3 juin 2016).
- [4] J. Quinten, V. Feldheim, Détermination d'un mur 1D équivalent à une structure 2D/3D : nouvelle fonction objectif, impact du flux solaire et des phénomènes surfaciques, *Proc. Congrès Français de Thermique 2017* (Marseille, 30 mai – 2 juin 2017).
- [5] J. Kosny, E. Kossecka, Equivalent wall as a dynamic model of a complex thermal structure, *Journal of Building Physics*, vol. 20 no. 3 (1997), 249-268.
- [6] B. Karambakkam, B. Nigusse, J. D. Spitler, A one-dimensional approximation for transient multi-dimensional conduction heat transfer in building envelopes, *Proc. 7th Symposium Physics in the Nordic Countries* (Reykjavik, Islande, 2005).
- [7] F. Aguilar, J. P. Solano, P. G. Vicente, Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent wall method, *Applied Thermal Engineering*, 67 (2014), 370-377.
- [8] Annexe B1 à l'arrêté du Gouvernement wallon du 15/05/2014 portant exécution du décret du 28/11/2013 relatif à la PEB : Documents de référence pour les pertes par transmission.