

# ÉTUDE NUMÉRIQUE DU TAUX DE RECOUVREMENT THERMIQUE DES DÉBITS D'AIR D'INFILTRATION AU SEIN DE PAROIS DE BÂTIMENTS

**Hilaire BABIN\*, Christian INARD\*\***

\*Project Manager, Ajtech, Site de Kerquessaud, 44350 Nantes, France

\*\*Professeur, Université La Rochelle, LEPTIAB, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

## 1. INTRODUCTION

Il est évident qu'une enveloppe de bâtiment étanche à l'air permet de diminuer les pertes énergétiques en hiver et les courants d'air assurant ainsi un meilleur confort thermique. Concernant les consommations énergétiques, il a été estimé que les pertes par la perméabilité représentent environ 10% des consommations énergétiques des bâtiments en Belgique et en Allemagne. Pour ces pays, le potentiel d'économie d'énergie due à l'étanchéité à l'air des enveloppes des bâtiments est du même ordre de grandeur que celui obtenu avec les capteurs solaires pour la production de l'Eau Chaude Sanitaire [1]. Ces ordres de grandeur s'appliquent également en France où les pertes énergétiques dues à la perméabilité à l'air des enveloppes de bâtiments sont estimées de 2 à 5 kWh/m<sup>2</sup>an des besoins de chauffage et ceci pour une différence de pression intérieur-extérieur égale à 50 Pa.

Par ailleurs, il est bien connu qu'il existe une relation entre la perméabilité à l'air des bâtiments et la qualité de l'air intérieur. Ainsi, une bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe d'un bâtiment permet une meilleure ventilation à l'aide d'un système de ventilation adéquat, ce qui n'est pas tou-

jours le cas. De plus, une bonne perméabilité à l'air des bâtiments permet de prévenir les dommages causés par d'éventuels phénomènes de condensation.

Un autre problème dû aux enveloppes non étanches consiste en la réduction de la résistance thermique des parois isolantes lorsqu'elles sont le siège d'infiltrations ou d'exfiltrations d'air. Ainsi, des expérimentations effectuées dans un laboratoire allemand [1] sur un panneau isolant de dimensions 1mx1mx0,14m ont montré qu'une fuite d'air à travers une ouverture de dimensions 1mx1mm peut réduire la résistance thermique de l'isolant jusqu'à un facteur 4,8. Or, les réglementations actuelles intègrent l'impact énergétique des infiltrations d'air en multipliant le débit de fuite d'air par la différence d'enthalpie massique entre l'intérieur et l'extérieur. En réalité, des échanges de chaleur peuvent intervenir entre l'air infiltré ou exfiltré et la paroi tout en modifiant les performances thermiques de cette dernière. Cet effet, qui peut devenir non négligeable dans le cas de bâtiments à très basse consommation d'énergie, n'est pas pris en compte actuellement dans les calculs de déperditions énergétiques liées aux fuites d'air. L'importance de ce phénomène est également fortement liée aux typologies des parois considérées. Ainsi, par exemple, les parois utilisées pour les bâtiments à ossature

métallique tels que bardage double peau ou panneaux sandwichés à parement acier [2] présentent un fort potentiel pour le phénomène de transfert de chaleur à travers une paroi isolante dû aux fuites d'air.

L'objet de cet article est de qualifier puis de quantifier l'impact du transit de l'air sur les performances thermiques des parois affectées.

## 2. LES FUITES D'AIR DANS UN ISOLANT POREUX

Dans le bilan thermique d'un bâtiment, une part des transferts de chaleur est due à la conduction de la chaleur dans les parois. La relation entre cette chaleur transférée  $Q_{\text{condc}}$  et la différence de température entre l'intérieur  $T_i$  et l'extérieur  $T_e$  dépend de la surface de l'enveloppe  $S$  et du coefficient de transmission de la paroi  $U_o$ .

$$Q_{\text{condc}} = U_o S (T_i - T_e) \quad (1)$$

L'indice c fait référence à un calcul conventionnel.

Cependant, lorsque de l'air traverse une paroi au travers de fissures, de trous... des pertes ou des apports de chaleur s'ajoutent au flux conductif. Une façon simplifiée de l'évaluer est de considérer la chaleur massique de l'air :

$$Q_{\text{inf}_c} = m C p_a (T_i - T_e) \quad (2)$$

avec :

$Q_{\text{inf}_c}$  flux de chaleur dû aux infiltrations et calculé par la méthode conventionnelle (W)

$C p_a$  chaleur spécifique de l'air (J/kg.K)

$m$  débit massique d'air infiltré (kg/s)

La première approche est d'ajouter ce flux aux pertes par conduction. C'est ce qui est actuellement réalisé pour le calcul des déperditions dans la réglementation thermique [3].

Les déperditions totales s'écrivent alors :

$$Q_{\text{totc}} = U_o S (T_i - T_e) + m C p_a (T_i - T_e) \quad (3)$$

En réalité, l'air infiltré ou exfiltré, en traversant le matériau poreux de l'enveloppe, échange de la chaleur avec celui-ci. Si le flux d'air est à contre sens du flux de chaleur par conduction, l'air prendra de la chaleur au milieu poreux. Inversement, si l'air et le flux de conduction sont de même sens, l'air cédera sa chaleur au milieu poreux. Bhattacharyya et Claridge [4] ont étudié expérimentalement cet échange de chaleur ainsi que l'importance du trajet de la fuite d'air. Pour quantifier cet échange, ils ont intégré un coefficient d'efficacité d'échange thermique ou taux de recouvrement  $\eta_{\text{tot}}$ .

Afin de pouvoir déterminer l'expression du taux de recouvrement  $\eta_{\text{tot}}$ , il est nécessaire de distinguer le cas des infiltrations d'air de celui des exfiltrations d'air.

Considérons une paroi avec infiltrations d'air couplée au volume d'air intérieur d'un local (Fig. 1).

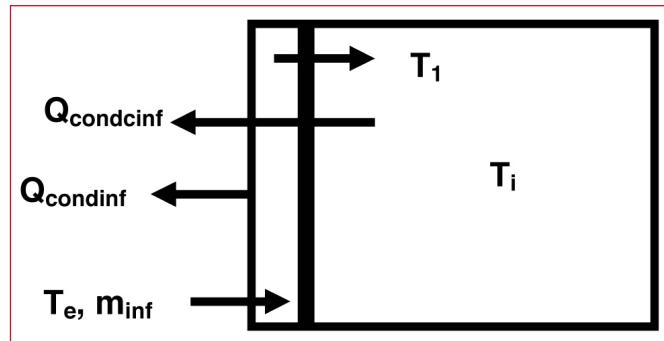


Figure 1. Vue d'une paroi avec infiltrations d'air.

Il est à noter que la température de l'air qui pénètre dans la paroi n'est pas strictement égale à la température de l'air extérieur à cause de la couche limite thermique le long de la paroi [5]. Toutefois et en première approximation, nous considérons la température extérieure comme la température de l'air à l'entrée de la paroi.

Les déperditions totales calculées de manière conventionnelles s'écrivent :

$$Q_{\text{totc}_\text{inf}} = Q_{\text{condc}_\text{inf}} + m_{\text{inf}} C p_a (T_i - T_e) \quad (4)$$

Les pertes totales en considérant l'air infiltré dans la paroi s'expriment par :

$$Q_{\text{totinf}} = Q_{\text{condinf}} + m_{\text{inf}} C p_a (T_i - T_1) \quad (5)$$

Le taux de recouvrement (efficacité) de la paroi est défini par :

$$\eta_{\text{inf}} = \frac{T_1 - T_e}{T_i - T_e} \quad (6)$$

L'équation (4) s'écrit alors :

$$Q_{\text{totc}_\text{inf}} = Q_{\text{condc}_\text{inf}} + (1 - \eta_{\text{inf}}) m_{\text{inf}} C p_a (T_i - T_e) \quad (7)$$

$Q_{\text{totc}_\text{inf}}$  devant être égal à  $Q_{\text{totinf}}$ , l'expression du taux de recouvrement pour les infiltrations  $\eta_{\text{inf}}$  est :

$$\eta_{\text{inf}} = 1 - \frac{m_{\text{inf}} C p_a (T_i - T_1) + Q_{\text{condinf}} - Q_{\text{condc}_\text{inf}}}{m_{\text{inf}} C p_a (T_i - T_e)} \quad (8)$$

D'après l'équation (8), il apparaît que la détermination du taux de recouvrement passe, notamment, par la connaissance de la température de l'air à la sortie de la paroi  $T_1$  et du flux échangé à la surface extérieure de la paroi  $Q_{\text{condinf}}$  en présence d'infiltrations d'air.

Le même raisonnement peut être effectué pour une paroi avec exfiltrations d'air (Fig. 2).

A l'instar de la paroi avec infiltrations, la température de l'air pénétrant dans la paroi n'est pas strictement égale à la température intérieure  $T_i$ . Cependant, en première approximation, nous considérons que l'air à l'entrée de la paroi est égale à  $T_i$ .

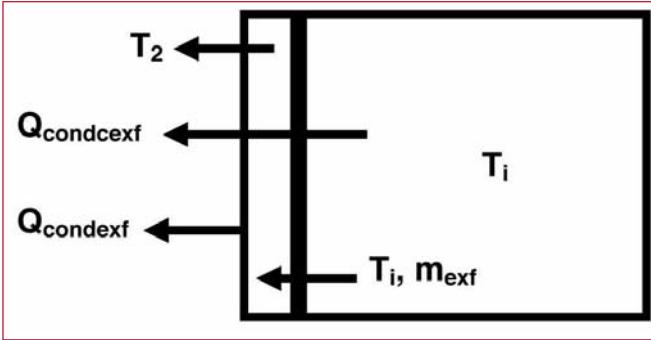


Figure 2. Vue d'une paroi avec exfiltrations d'air.

Comme précédemment, nous pouvons écrire les déperditions conventionnelles  $Q_{\text{totcexf}}$  et celles qui intègrent les échanges par exfiltration d'air  $Q_{\text{totexf}}$  :

$$Q_{\text{totcexf}} = Q_{\text{condcexf}} + m_{\text{ext}} C p_a (T_i - T_e) \quad (9)$$

$$Q_{\text{totexf}} = Q_{\text{condcexf}} + m_{\text{ext}} C p_a (T_2 - T_i) \quad (10)$$

Le taux de recouvrement pour l'exfiltration s'écrit :

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{T_2 - T_i}{T_e - T_i} \quad (11)$$

L'équation (9) devient alors :

$$Q_{\text{totcexf}} = Q_{\text{condcexf}} - \eta_{\text{ext}} m_{\text{ext}} C p_a (T_i - T_e) \quad (12)$$

A partir des équations (10) et (12), nous obtenons l'expression du taux de recouvrement pour une paroi avec exfiltrations d'air :

$$\eta_{\text{ext}} = - \frac{m_{\text{ext}} C p_a (T_2 - T_i) + Q_{\text{condcexf}} - Q_{\text{condcexf}}}{m_{\text{ext}} C p_a (T_i - T_e)} \quad (13)$$

La détermination du taux de recouvrement d'une paroi avec exfiltrations d'air  $\eta_{\text{ext}}$  nécessite la connaissance de la température de l'air à la sortie de la paroi  $T_2$  et du flux conductif à la surface extérieure de la paroi avec exfiltrations  $Q_{\text{condcexf}}$ .

A partir des taux de recouvrement d'infiltration  $\eta_{\text{inf}}$  et d'exfiltration  $\eta_{\text{ext}}$ , il est possible d'obtenir le taux de recouvrement total du local  $\eta_{\text{tot}}$ .

Pour cela, il suffit de faire la somme des équations (7) et (12). En considérant que  $m_{\text{inf}} = m_{\text{ext}}$  (conservation de la masse), il vient :

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{condc}} + (1 - \eta_{\text{tot}}) m C p_a (T_i - T_e) \quad (14)$$

avec :

$$m = m_{\text{inf}} = m_{\text{ext}}$$

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{inf}} + \eta_{\text{ext}}$$

Deux approches ont été initiées pour étudier l'échange de chaleur entre l'air infiltré et le flux de conduction dans un isolant poreux. La plus classique et la plus utilisée est de simuler avec un code CFD ce transfert de chaleur. Ceci a

été fait notamment par Qiu [6], Barhoun [7], Buchanan et Sherman [8], Abadie et al [5] et Walker et Sherman [9]. Pour pouvoir comparer les différents résultats entre eux, les débits sont adimensionnés en utilisant le nombre de Peclet Pe défini par :

$$Pe = \frac{m C p_a}{U_o S} \quad (15)$$

Différentes configurations ont été étudiées [5, 8] (Fig. 3) :

- entrée basse et sortie haute (I-LH et E-LH) est la configuration présentant un taux de recouvrement élevé car le parcours de l'air au sein de la paroi est long ;
- entrée et sortie au même niveau (I-ST et E-ST) présente un faible taux de recouvrement et surtout une zone d'influence de la fuite d'air réduite à une surface équivalente à l'épaisseur de l'isolant ;
- entrée haute et sortie basse (I-HL et E-HL) présente un long parcours de l'air mais ce n'est pas un parcours naturel d'infiltration car il est inverse au tirage thermique en configuration hiver.

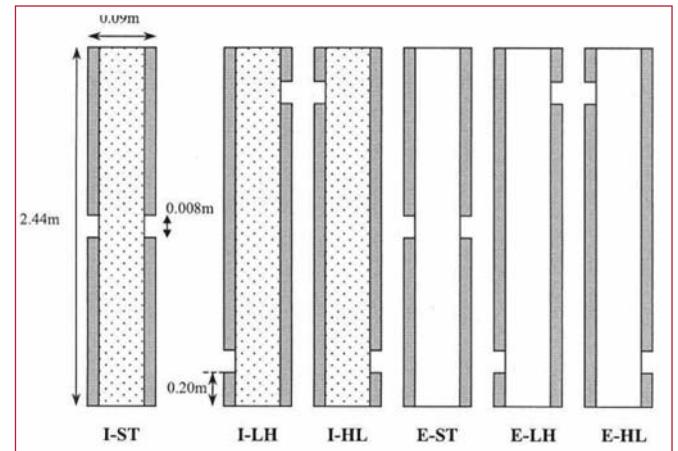


Figure 3. Cas étudiés par Abadie et al [5] et Buchanan et Sherman [8].

Abadie et al [5] ont observé que les débits d'air infiltrés varient de 0,1 l/s à 1 l/s, correspondant à des valeurs du nombre de Peclet comprises entre 0,1 et 5. Ils observent naturellement que, pour un même nombre de Peclet, le taux de recouvrement  $\eta_{\text{tot}}$  est d'autant plus important que le chemin parcouru par l'air est long. Ils corroborent ainsi les résultats déjà observés par Buchanan et Sherman [8].

Barhoun [7] a étudié l'influence de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et a remarqué qu'aussi bien pour l'infiltration que pour l'exfiltration, l'écart de température n'a pas d'influence sur le taux de recouvrement. De même les coefficients d'échange superficiels convectifs extérieur  $h_{ce}$  et intérieur  $h_{ci}$  ont de l'influence sur la résistance thermique de la paroi, mais pas sur le taux de recouvrement [6].

On pourrait s'attendre à ce que les propriétés physiques du matériau poreux influent sur l'échange thermique. En effet,

la porosité ou la résistivité au passage de l'air sont les deux paramètres qui permettent cet écoulement, ils ont donc forcément un rôle à jouer. Barhoun [7] a étudié cette influence. Pour cela il a mesuré les propriétés de 3 matériaux isolants poreux : la laine de verre, la laine de roche et la laine de chanvre. Après avoir simulé ces cas, pour une même géométrie de paroi, il conclut que la perméabilité à l'air du matériau n'est pas un paramètre influant sur le taux de recouvrement  $\eta_{tot}$ .

Enfin Qiu [6] a testé l'influence de la porosité pour une plage allant de 0,5 à 0,9 sur le taux de recouvrement, et conclut à une faible influence. L'influence la plus importante a été observée pour les faibles débits.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons de déterminer le taux de recouvrement de plusieurs types de parois lourdes et légères.

Pour cela, nous utilisons la simulation numérique faisant appel à la résolution des équations de Navier-Stokes (CFD).

### 3. SIMULATION NUMÉRIQUE DU TRANSFERT AÉRAULIQUE DANS UNE PAROI ISOLANTE POREUSE

Pour la phase gazeuse (air), les équations à résoudre concernent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Vu la géométrie étudiée, les calculs seront effectués en 2 dimensions. De plus, une évaluation du nombre de Reynolds de l'écoulement [10] permet, grâce au classement proposé par Pedras et de Lemos [11], de nous placer en régime de Darcy (lamininaire).

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

avec :

$u_i$  composantes de la vitesse (m/s)  
 $x_i$  coordonnées cartésiennes (m)

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\rho_a}{\varepsilon^2} \left( \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\mu_a}{\pi} u_i - g_i \rho_a \quad (17)$$

avec :

$\rho_a$  masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\varepsilon$  porosité du matériau (-)  
 $p$  pression (Pa)  
 $\mu_a$  viscosité dynamique de l'air ( $\text{kg/ms}$ )  
 $\pi$  perméabilité du matériau ( $\text{m}^2$ )  
 $g$  accélération de la pesanteur ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $t$  temps (s)

L'équation de conservation de l'énergie de l'air dans les pores du matériau s'écrit :

$$\varepsilon \rho_a C_p a \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a C_p a u_i \frac{\partial T_a}{\partial x_i} = \varepsilon \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial x_i^2} + u_i \left( - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \rho_a \right) \quad (18)$$

avec :

$T_a$  température de l'air ( $^\circ\text{C}$ )  
 $\lambda_a$  conductivité thermique de l'air ( $\text{W/mK}$ )

Dans l'équation (18), la dissipation thermique est modélisée par le produit de la vitesse du fluide et des gradients de pression [12].

Concernant la phase solide, seule l'équation de l'énergie est mise en jeu :

$$(1-\varepsilon) \rho_s C_p s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon) \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x_i^2} \quad (19)$$

avec :

$\rho_s$  masse volumique du solide ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\lambda_s$  conductivité thermique du solide ( $\text{W/mK}$ )  
 $T_s$  température du solide ( $^\circ\text{C}$ )

Il est à noter que le matériau solide est supposé sec et qu'il n'y a pas condensation.

Grâce à des simulations CFD, Buchanan et Sherman [8] ont montré que les températures  $T_a$  et  $T_s$  sont très proches dès une pénétration de 50  $\mu\text{m}$  dans le solide. Ainsi, en posant  $T_a = T_s = T$  et en faisant la somme des équations (18) et (19), il vient :

$$[\varepsilon(\rho_a C_p a) + (1-\varepsilon)\rho_s C_p s] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a C_p a u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = [\varepsilon \lambda_a + (1-\varepsilon)\lambda_s] \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + u_i \left( - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_a g_i \right) \quad (20)$$

Aux équations (16), (17) et (20), il est nécessaire d'associer leurs conditions aux limites. Celles-ci sont :

Surface intérieure :

$$-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ci} (T_{si} - T_i) \quad (21)$$

avec :

$\lambda_i$  conductivité thermique du matériau de la paroi intérieure ( $\text{W/mK}$ )  
 $T_{si}$  température de surface intérieure de la paroi ( $^\circ\text{C}$ )

Surface extérieure :

$$-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ce} (T_{se} - T_e) \quad (22)$$

avec :

$\lambda_e$  conductivité thermique du matériau de la paroi extérieure ( $\text{W/mK}$ )  
 $T_{se}$  température de surface extérieure de la paroi ( $^\circ\text{C}$ )

Les liaisons de la paroi verticale avec respectivement le plancher et le plafond sont supposées être adiabatiques :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

Entrée d'air :

L'entrée d'air est considérée comme un débit massique d'air imposé à la température de l'air extérieur pour les infiltrations et à la température intérieure pour les exfiltrations :

$$\phi = m C p_a T_{ioue} \quad (24)$$

Sortie d'air :

La condition limite pour la sortie d'air est donnée par la conservation de la masse :

$$m_{\text{entrée}} = m_{\text{sortie}} \quad (25)$$

## 4. CAS D'ÉTUDE

Pour résoudre le système d'équations précédent nous avons utilisé le logiciel Fluent version 6.3.26 associé au mailleur Gambit version 2.3.16. Une comparaison avec un des cas de la littérature [10] a permis de valider le modèle utilisé.

Le but de l'étude est de déterminer le taux de recouvrement tant en situation d'infiltration que d'exfiltration et ceci pour différentes structures de paroi.

Notre choix s'est porté sur quatre types de parois courantes :

- Paroi 1 : Structure lourde à isolation intérieure ;
- Paroi 2 : Structure lourde à isolation extérieure ;
- Paroi 3 : Bardage bois à isolation répartie ;
- Paroi 4 : Bardage acier à isolation répartie.

Les Figures 4 à 7 donnent une vue de chaque paroi et le Tableau 1 donne les caractéristiques dimensionnelles et thermo-physiques des parois.

Pour la géométrie modélisée, nous avons utilisé un maillage cartésien avec 302580 mailles. L'algorithme de résolution choisi est l'algorithme SIMPLE et les résidus sur les bilans de masse et d'énergie ont été fixés à  $10^{-6}$ .

La perméabilité à l'air  $\pi$  et la porosité  $\varepsilon$  de la laine de roche sont respectivement égales à  $1,69 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  et 0,8. En tenant compte des coefficients d'échange superficiels extérieur et intérieur donnés par la réglementation [3], les valeurs du coefficient  $U_o$  des parois varient de 0,367 à 0,375  $\text{W/m}^2\text{K}$ . Ces valeurs sont très proches car c'est l'épaisseur de l'isolant qui apporte l'essentiel de la résistance thermique. Dans la suite de l'étude, nous considérons une valeur moyenne égale à 0,371  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

Nous considérons trois débits de fuite correspondant respectivement aux valeurs par défaut et de référence de la

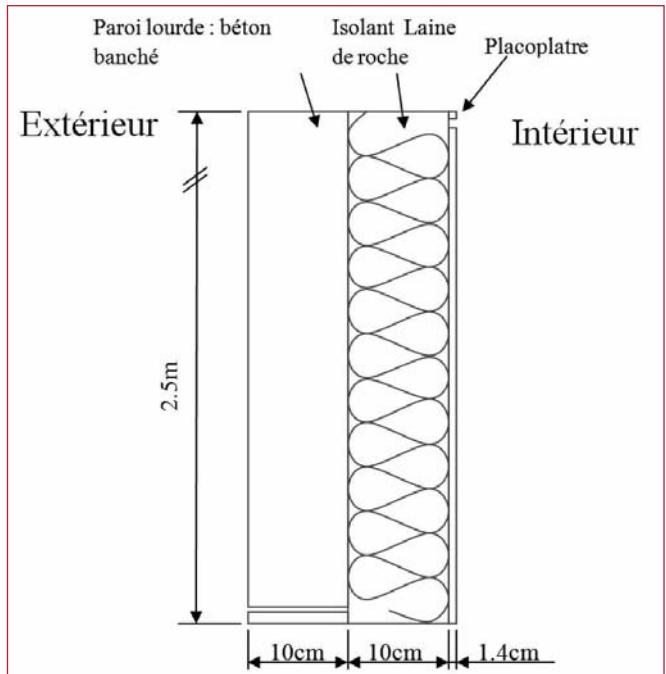


Figure 4. Vue de la paroi 1  
(structure lourde, isolation intérieure).

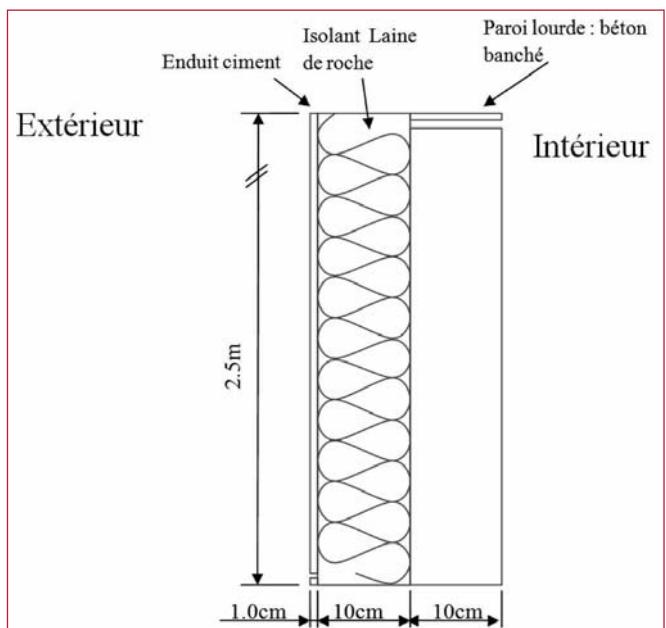
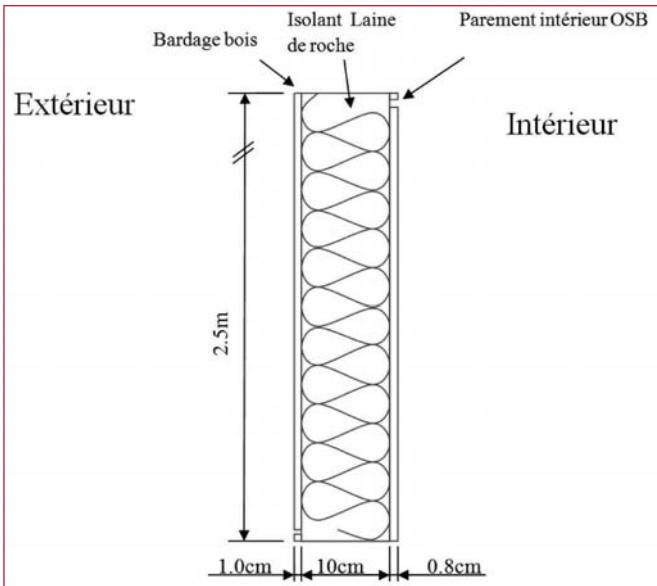


Figure 5. Vue de la paroi 2  
(structure lourde, isolation extérieure).

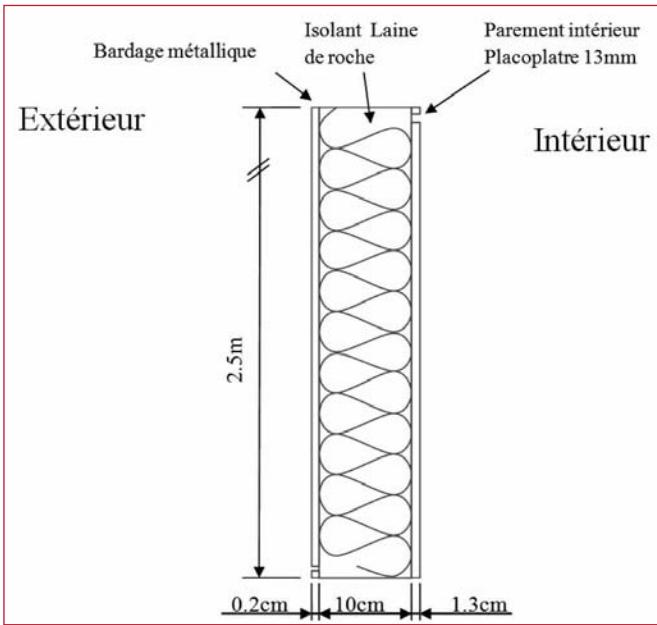
réglementation thermique [3] et du label PassivHaus [13] pour une maison individuelle. De plus, nous considérons une maison individuelle de dimensions  $10 \times 10 \times 2,5 \text{ m}$  c'est-à-dire ayant  $200 \text{ m}^2$  de parois en contact avec l'extérieur hors plancher bas en considérant une toiture terrasse. Le tableau 2 donne les valeurs des débits d'air de fuite obtenus ainsi que celles du nombre de Peclet pour lequel une longueur unitaire de paroi a été considérée.

Pour chaque paroi simulée, nous avons considéré un cas d'infiltration d'air et un cas d'exfiltration.

Une fois réalisées les simulations numériques, il est possible de déterminer les taux de recouvrement à l'aide des équations (8) pour  $\eta_{\text{inf}}$  et (13) pour  $\eta_{\text{exf}}$  respectivement.



**Figure 6. Vue de la paroi 3  
(bardage bois, isolation répartie).**

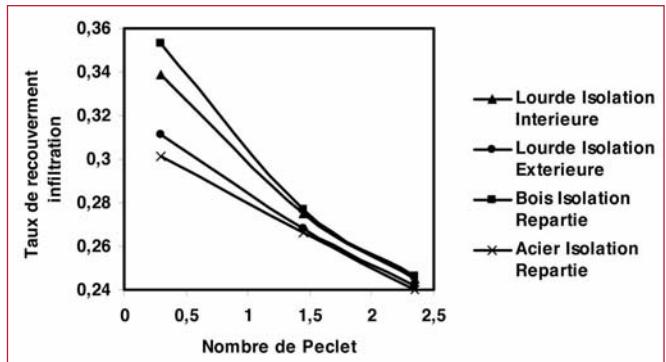


**Figure 7. Vue de la paroi 4  
(bardage acier, isolation répartie).**

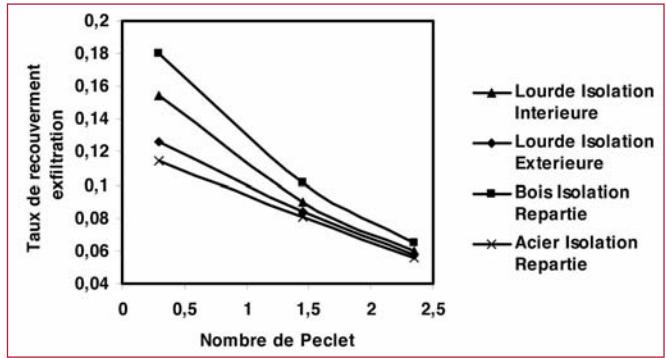
Les figures 8, 9 et 10 montrent respectivement les valeurs des taux de recouvrement  $\eta_{\text{inf}}$ ,  $\eta_{\text{exf}}$  et  $\eta_{\text{tot}}$  en fonction du nombre de Peclet Pe.

Les figures 9 à 10 appellent plusieurs commentaires. Pour tous les types de paroi, il apparaît que le taux de recouvrement aussi bien en infiltration qu'en exfiltration diminue lorsque le nombre de Peclet augmente. Ainsi, plus le débit est élevé (nombre de Peclet élevé), moins l'échange de chaleur a le temps de s'établir.

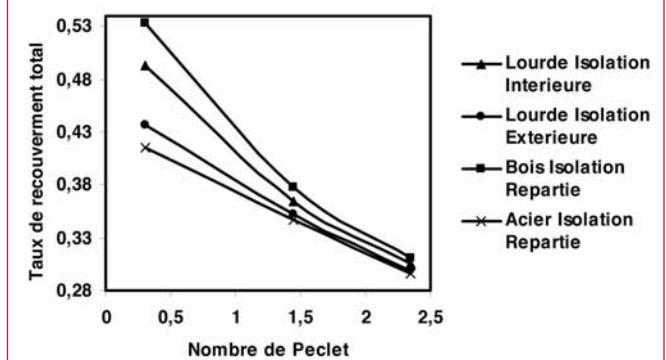
Les courbes présentent les mêmes tendances en infiltration et en exfiltration. Cependant, le taux de recouvrement en infiltration est dans tous les cas supérieur au taux de recouvrement en exfiltration.



**Figure 8. Valeurs du taux de recouvrement infiltration en fonction du nombre de Peclet.**



**Figure 9. Valeurs du taux de recouvrement exfiltration en fonction du nombre de Peclet.**



**Figure 10. Valeurs du taux de recouvrement total en fonction du nombre de Peclet.**

Cela est dû au fait que l'échange de chaleur se fait à contre-courant pour les infiltrations alors qu'il se fait à co-courant pour les exfiltrations.

Quelle que soit la structure de la paroi, la différence entre le taux de recouvrement en infiltration et celui en exfiltration est quasiment constante et de l'ordre de 0,18. Ce résultat a déjà été obtenu par [5].

La composition de la paroi a une influence sur les valeurs du taux de recouvrement. Pour la plus petite valeur du nombre de Peclet à savoir 0,27, l'écart relatif maximum est de 13,5% pour l'infiltration et de 33,9% pour l'exfiltration. Les quatre courbes de taux de recouvrement tendent à se rejoindre quand le nombre de Peclet augmente. Cela suggère que pour des valeurs du nombre de Peclet élevées, la structure de la paroi n'a pas d'influence sur le taux de recouvrement. Par contre la structure de la paroi est un paramètre influent pour les faibles valeurs du nombre de

PAROI 1				
Hauteur totale H = 2,5 m		Epaisseur totale E = 0,213 m		
Matériaux	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Cp (J/kg K)
Béton	0,1	2000	1,65	1000
Laine de roche	0,1	129	0,041	1030
Plâtre	0,013	900	0,23	1000
PAROI 2				
Hauteur totale H = 2,5 m		Epaisseur totale E = 0,210 m		
Matériaux	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Cp (J/kg K)
Crépi	0,01	1000	1,23	1000
Laine de roche	0,1	129	0,041	1030
Béton	0,1	2000	1,65	1000
PAROI 3				
Hauteur totale H = 2,5 m		Epaisseur totale E = 0,118 m		
Matériaux	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Cp (J/kg K)
Bardage bois	0,01	900	0,23	1000
Laine de roche	0,1	129	0,041	1030
Parement OSB	0,008	650	0,13	1700
PAROI 4				
Hauteur totale H = 2,5 m		Epaisseur totale E = 0,115 m		
Matériaux	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Cp (J/kg K)
Bardage acier	0,002	7500	50	450
Laine de roche	0,1	129	0,041	1030
Plâtre	0,013	900	0,23	1000

Tableau 1. Composition des parois étudiées.

	RT2005 défaut	RT2005 référence	PassivHaus
$I_4(m^3/h m^2)$	1,3	0,8	0,15
Débit massique linéaire (kg/s m)	0,00217	0,00133	0,00025
Pe	2,34	1,43	0,27

Tableau 2. Valeurs des débits d'air de fuite et du nombre de Peclet.

Peclet. En rapportant cette constatation aux débits d'air d'infiltration étudiés, cela veut dire que pour un débit correspondant au facteur  $I_4$  par défaut de la réglementation thermique, la composition de la paroi n'a aucune influence sur le taux de recouvrement. A l'inverse, pour des bâtiments relativement étanches (PassivHaus), la composition de la paroi influe significativement.

Le taux de recouvrement est meilleur pour la paroi à structure légère bois, suivi par la structure lourde à isolation intérieure puis la structure lourde à isolation extérieure et enfin la structure légère acier. Le taux de recouvrement plus faible observé pour cette dernière paroi peut être attribué à une résistance thermique quasi-nulle de la couche extérieure de la paroi.

## 5. EXEMPLE D'APPLICATION

Nous considérons la maison individuelle utilisée pour déterminer les coefficients de recouvrement des différentes parois (voir Section 3).

L'objectif est dévaluer l'influence de la prise en compte du phénomène de recouvrement sur les déperditions par infiltration d'air. Pour cela, nous supposons que la moitié du débit d'air infiltré transite à travers l'isolant. Cela donne

130 m<sup>3</sup>/h et 80 m<sup>3</sup>/h pour la valeur par défaut de la RT2005 et la valeur de référence de la RT2005 respectivement.

Par ailleurs, une régression polynomiale du second ordre nous a permis d'exprimer le taux de recouvrement total  $\eta_{tot}$  de chaque paroi en fonction du nombre de Peclet Pe. Les expressions obtenues sont :

Paroi bois à isolation répartie :

$$\eta_{tot} = 0,0294 Pe^2 - 0,1863 Pe + 0,5862 \quad (26)$$

Paroi lourde à isolation intérieure :

$$\eta_{tot} = 0,0218 Pe^2 - 0,1494 Pe + 0,5359 \quad (27)$$

Paroi lourde à isolation extérieure :

$$\eta_{tot} = 0,0073 Pe^2 - 0,0867 Pe + 0,4600 \quad (28)$$

Paroi acier à isolation répartie :

$$\eta_{tot} = 0,0016 Pe^2 - 0,0628 Pe + 0,4347 \quad (29)$$

Les équations (26) à (29) ont été utilisées pour déterminer le taux de recouvrement de chaque paroi pour les trois valeurs du débit de fuite considérées (Tableau 3).

La lecture du Tableau 3 amène les mêmes conclusions que celles faites précédemment (voir Section 3 et Figure 10) avec, notamment, une augmentation du taux de recouvre-

Type de paroi	Pe = 1,170 Défaut RT2005	Pe = 0,715 Référence RT 2005
Bois isolation répartie	0,408	0,468
Lourde isolation intérieure	0,391	0,440
Lourde isolation extérieure	0,366	0,402
Acier isolation répartie	0,363	0,391

Tableau 3. Valeurs du taux de recouvrement total  $\eta_{tot}$  de la maison individuelle.

ment total  $\eta_{tot}$  lorsque le débit de fuite décroît i.e. pour une diminution de la valeur du nombre de Peclet Pe et pour un même niveau d'isolation de la paroi.

En considérant un écart relatif entre le calcul conventionnel des déperditions par infiltrations (Eq. 2) et le calcul intégrant le taux de recouvrement (Eq. 14 sans  $Q_{condc}$ ), la part relative du flux échangé par recouvrement  $\Delta\Phi r$  s'écrit :

$$\Delta\Phi r = \frac{\eta_{tot}}{2} \times 100 \quad (30)$$

Le facteur  $\frac{1}{2}$  provient du fait que seule la moitié du débit d'air d'infiltration transite à travers les parois et est donc soumis au phénomène de recouvrement.

Pour le cas étudié, la valeur de  $\Delta\Phi r$  varie de 18,2% à 23,4% en considérant les trois débits de fuite et les quatre types de paroi étudiés.

## 6. CONCLUSION

Les économies d'énergie du secteur du bâtiment sont au cœur de nombreuses discussions. Une des pistes suivie pour diminuer les déperditions est d'augmenter la résistance thermique des parois. Dans ces conditions, les fuites d'air dues à la perméabilité de l'enveloppe des bâtiments peuvent devenir un poste important des déperditions. Par ailleurs, la méthode de calcul conventionnelle des déperditions par infiltration considère systématiquement l'écart de température extérieur-intérieur. Or, lorsque les infiltrations ou les exfiltrations ont lieu au sein d'une paroi poreuse isolante, il existe un échange de chaleur entre l'air et la paroi.

Pour tenir compte de ce phénomène, il a été proposé d'introduire la notion de taux de recouvrement. Après l'avoir défini, une étude numérique menée à l'aide d'un code CFD a permis de déterminer le taux de recouvrement pour 4 types de paroi. La principale conclusion est que le taux de recouvrement dépend du débit de fuite à savoir plus le débit de fuite est faible plus le taux de recouvrement est élevé. De plus, le taux de recouvrement dépend du type de paroi.

Enfin, un exemple d'application sur une maison individuelle est présenté. Les résultats montrent que, dans ce cas, le phénomène de recouvrement au sein des parois peut représenter de 18,2% à 23,4% des déperditions conventionnelles par infiltration c'est-à-dire sans tenir compte du taux de recouvrement.

## 7. RÉFÉRENCES

- [1] F.R. Carrié, B. Rosenthal. An overview of national trends in envelope and ductwork airtightness. AIVC, VIP n°29, 2006
- [2] RT 2000. Bâtiments en construction métallique, guide de bonnes pratiques. SEBTP, Paris, 2006
- [3] RT2005. Réglementation thermique, guide réglementaire CSTB, France, 2006
- [4] S. Bhattacharyya, D.E. Claridge. The energy impact of air leakage through insulated walls Journal of Solar Engineering, 117, 1995, 167-172
- [5] M. O. Abadie, E. U. Finlayson, A. Gadgil. Infiltration heat recovery in building walls : computational fluid dynamics investigations results. Lawrence Berkeley National Laboratory, report n°51324, Berkeley, USA, 2002
- [6] K. Qiu. Air infiltration and heat exchange performance of the building envelope, PhD Thesis, Concordia University, Montreal, CA, 2006
- [7] Y. Barhoun. Influence des transferts aérauliques dans les parois sur leurs performances thermiques. Thèse Doctorat, INSA Lyon, Lyon, France, 2006
- [8] C.R. Buchanan, M.H. Sherman. A mathematical model for infiltration heat recovery. Lawrence Berkeley National Laboratory, report n°44294, Berkeley, USA, 2000
- [9] I.S. Walker, M.H. Sherman. Heat recovery in building envelopes. Annual AIVC Conference, Washington, 2003
- [10] H. Babin. Influence des transferts aérauliques sur les performances thermiques des parois de bâtiments. Mémoire de Master, Université de Nantes, 2008
- [11] M.H.J. Pedras, M.J.S. de Lemos. Macroscopic turbulence modelling for incompressible flow through undeformable porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 2001, 1081-1093
- [12] A. Bejan. Convection heat transfer. Second Edition, A. Wiley Interscience Publication, Durham, USA, 1995
- [13] W. Feist. Passive House Planning Package 2004. Passiv Haus Institut, Technical Information PHI-2004/1(E), Darmstadt, Germany, 2004