

Démarche pour l'étude de l'impact des transferts d'air liés aux défauts d'étanchéité sur le comportement de l'enveloppe des bâtiments à ossature bois.

Clément Belleudy^{1,2}, Nolwenn Hurel¹, Marx Chhay¹, Mickaël Pailha¹, Monika Woloszyn¹, Daniel Quenard², Géraldine Garnier²

¹ LOCIE, UMR CNRS 5271, Université de Savoie, F-73376 Le Bourget-Du-Lac cedex

² Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, DEE / Enveloppes et Matériaux Innovants, 24 rue Joseph Fourier – F-38400 St Martin d'Hères

*monika.woloszyn@univ-savoie.fr

RESUME. Dans un contexte de durcissement des réglementations thermiques, la compréhension et la maîtrise des transferts d'air à travers les enveloppes des bâtiments deviennent essentielles. Cet article présente le développement d'un modèle air-chaleur ainsi que sa pré-validation par mesures expérimentales pour une application en régime stationnaire à un défaut d'étanchéité. Un banc original de tracé des chemins d'air est en cours de conception au LOCIE afin de valider le modèle dans de nouvelles configurations et de caractériser localement les défauts d'étanchéité. La pertinence de l'utilisation originale de la PIV et de microparticules pour identifier les entrées, sorties, et chemins de l'air dans la paroi est vérifiée.

MOTS-CLÉS : défaut d'étanchéité, modèle numérique, banc expérimental

ABSTRACT. To meet the higher requirements of current and future building codes, understanding and controlling air transfer through building envelopes is of importance. In this paper, the development of a simplified heat-airflow numerical model is presented and a first comparison with experimental data is performed. An experimental setup to visualize air paths in fibrous insulation materials is currently being built at the LOCIE laboratory, in order to both validate the numerical model and assess local behaviour of air tightness defects. A discussion is presented aiming to justify the relevance of PIV and microparticles techniques to identify the air inlets and outlets, as well as the air paths in the wall.

KEYWORDS : air leakage, numerical model, experimental setup.

1. INTRODUCTION

Dans un souci de performances énergétiques, les nouvelles réglementations thermiques, RT2012, future RT2020, label Passivhaus, imposent un haut niveau d'étanchéité à l'air des bâtiments. Les enveloppes légères à ossature bois sont particulièrement sensibles aux transferts d'air par les défauts structurels et les joints. Ces transferts ont un impact sur l'étanchéité globale d'un bâtiment, mais également sur les champs hygro-thermiques locaux et peuvent conduire à des dégradations de performance.

Scientifiquement, il s'agit d'un problème d'écoulement de l'air humide anisotherme dans les géométries confinées complexes, comprenant des milieux poreux hygroscopiques. Cette physique complexe doit être comprise afin d'évaluer, de manière précise, l'impact des transferts d'air parasites sur la performance d'une structure à ossature bois. L'association d'un travail de modélisation et de

simulation numérique avec des caractérisations expérimentales est nécessaire pour progresser dans cette compréhension. Cet article présente la première étape d'un projet national, mené conjointement par le LOCIE et le CSTB et intégré dans un projet ANR VBD 2012 MOBAIR, coordonné par le CETHIL. Il se décompose en deux parties, à savoir l'aspect modélisation traitant de la construction et de l'évaluation d'un modèle air-chaaleur, puis l'aspect expérimental avec la présentation d'un banc original permettant l'identification des chemins de l'air dans les parois.

2. MODÉLISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

2.1. ÉTAT DE L'ART ET CONTRIBUTION

L'influence des transferts d'air à travers les isolants poreux a été traitée à partir de la fin des années 80 : (Wagner 1989) montre expérimentalement qu'une fente de 1 mm à travers une membrane placée sur un isolant fibreux peut diminuer sa résistance thermique effective d'un facteur 4,8. Des études de Saint Gobain évaluent l'impact de la convection naturelle dans l'isolation de sous toiture sur les infiltrations et les exfiltrations d'air (Langlais, Arquis, and McCaa 1990). Dans les années 2000, différentes configurations de murs sont étudiées présentant des fissures sur les parements extérieurs et intérieurs, mettant en évidence différents chemins d'air à travers l'isolation (Buchanan and Sherman 2000) (Abadie, Finlayson, and Gadgil 2002). (Barhoun 2006) développe un modèle simplifié de paroi soumise à une infiltration d'air, et définit un coefficient de perte thermique $U_{\text{éq}}$ prenant ainsi en compte l'impact de la fuite d'air sur la performance globale de la paroi. Plus récemment, des modèles couplés air-chaaleur-humidité (HAM – Heat-Air-Moisture) ont été développés, certains en 1D avec un flux d'air uniforme sur toute la section du mur (Li, Rao, and Fazio 2009), (Tariku, Kumaran, and Fazio 2010), ou certains en 3D modélisant les flux d'air à travers les lames d'air entre les différents éléments d'assemblage du mur (Saber et al. 2012). Très récemment, (Langmans 2013) a développé un modèle HAM 2D implémenté dans le logiciel Delphin, modélisant un flux d'air à travers les fissures sur les membranes pare-air/vapeur et évaluant son impact sur la capacité de séchage du mur.

Pour inscrire notre travail dans la continuité des travaux cités, nous visons à terme le développement d'un modèle HAM complet, suffisamment versatile pour traiter à la fois un écoulement d'air dans un milieu poreux et à travers une fine lame d'air, et représentatif des conditions aux limites les plus pertinentes en fonction de la configuration traitée. Un défaut d'étanchéité peut présenter des configurations très différentes, et il apparaît alors nécessaire de classifier ces défauts en fonction de la physique mise en jeu. Deux grandes catégories de défauts ont été définies pour bâtir notre modèle : ceux avec des fissures superficielles et ceux avec des fissures traversantes, comme le montre la figure 1.

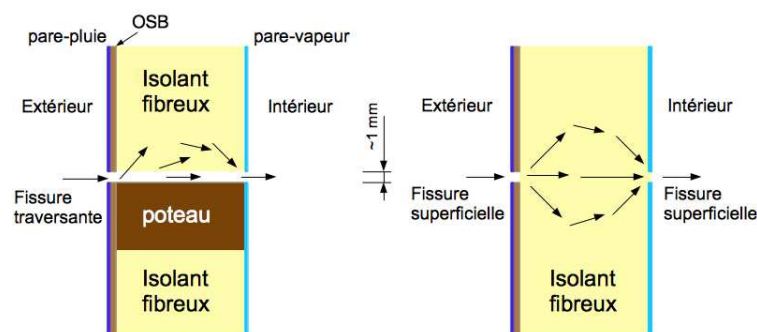


Figure 1 : Configurations de défauts ciblés: fissure traversante et fissures superficielles.

2.2. DESCRIPTION DU MODÈLE AIR-CHALEUR

La première étape a été la construction d'un modèle air-chaueur et son implémentation dans l'environnement Comsol. Pour décrire le transfert couplé de chaleur et de masse à travers un défaut d'étanchéité, on utilise les lois de conservations de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Dans le milieu poreux, l'approximation des milieux continus, qui consiste à moyenner les grandeurs physiques sur un volume élémentaire représentatif - VER (Bories et al. 2008), a été utilisée. Ainsi, on travaille dans le milieu poreux avec une vitesse moyennée u , appelée "vitesse de Darcy". Pour un écoulement à travers un milieu poreux, la loi de Darcy-Brinkman, est utilisée en régime stationnaire pour exprimer la conservation de la quantité de mouvement. Pour la fissure traversante il est également possible d'utiliser la même loi, en remplaçant la perméabilité du milieu par la propriété équivalente de la fissure.

La conservation de l'énergie est écrite en faisant l'hypothèse de l'équilibre thermique local entre le fluide et la matrice solide du milieu poreux. Cette hypothèse a été justifiée par plusieurs auteurs, dont notamment (Buchanan and Sherman 2000). L'équation ne fait donc intervenir plus qu'une seule température T , celle du milieu. Les flux dans la partie droite de l'équation représentent la conduction thermique et l'advection de la chaleur liée au transfert d'air :

$$\rho_{mat} c_{mat} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda_{mat} \nabla T) - \nabla \cdot (\rho_{air} c_{p_{air}} T u) \quad (1)$$

où ρ_{mat} et ρ_{air} (resp. $c_{p_{mat}}$ et $c_{p_{air}}$) sont les masses volumiques (resp. capacités calorifiques) de l'isolant et de l'air, λ_{mat} la conductivité thermique de l'isolant.

Le choix des conditions aux limites n'est pas immédiat dans de telles configurations, notamment au niveau des fissures. Après l'analyse des configurations traitées dans la littérature et des tests préliminaires, les conditions aux limites suivantes ont été retenues :

- Conditions de flux nul en température : sections adiabatiques en haut et en bas ; en vitesse : toute la frontière à l'exception de l'entrée et sortie de la fissure,
- Condition d'échange convectif est fixée sur les frontières étanches à l'air non adiabatiques :

$$n \cdot (-\lambda_{mat} \nabla T - \rho_{air} c_{p_{air}} T u) = h_{conv} (T - T_{amb}) \quad (2)$$

où n est la normale sortante à la surface et h_{ext} le coefficient d'échange thermique par convection

- Conditions de type Dirichlet : température et vitesse imposées à l'entrée de la fissure
- Conditions de frontière ouverte, en température et en vitesse à la sortie de la fissure

$$\begin{cases} \nabla T \cdot n = 0 & \text{si } n \cdot u \geq 0 \\ T = T_{amb} & \text{si } n \cdot u < 0 \end{cases} \quad \sigma \cdot n = 0 \quad (3)$$

où σ est le tenseur des contraintes.

2.3. APPLICATION

Ce modèle a été appliqué en régime stationnaire à un défaut d'étanchéité créé dans un isolant de ouate de cellulose (Belleudy and Kayello 2014). Sur la figure 2, on constate que le flux d'air déplace

les isothermes dans le sens de l'écoulement. La comparaison avec les mesures, présentée figure 3, montre une bonne concordance expérience/modèle. Les écarts observés pourraient s'expliquer par un manque d'homogénéité de la cellulose, déjà mis en évidence par (Labat 2012).

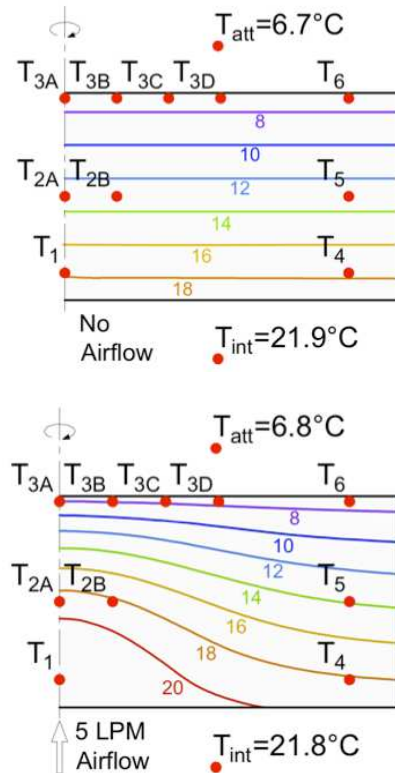


Figure 2 : points de mesures expérimentaux et isothermes obtenus grâce au modèle, sans flux d'air puis avec un flux d'air de 5L/min (noté LPM)

	Expérience / Simulation	
	Sans débit d'air	Débit d'air 5L/min
T_{int}	21,9 / 21,9	21,8 / 21,8
T_1	16,6 / 17,7	20,8 / 21,8
T_{2A}	12,1 / 13,1	19,4 / 18,9
T_{2B}	12,1 / 13,1	19,0 / 18,3
T_{3A}	6,4 / 7,2	7,9 / 8,0
T_{3B}	6,4 / 7,2	7,5 / 8,0
T_{3C}	6,4 / 7,2	7,2 / 7,8
T_{3D}	6,3 / 7,2	6,8 / 7,6
T_4	16,3 / 17,7	17,3 / 18,2
T_5	12,0 / 13,1	13,3 / 13,9
T_6	6,4 / 7,2	6,6 / 7,4
T_{att}	6,7 / 6,7	6,8 / 6,8

Figure 3 : Températures expérimentales et simulées aux points de mesures en °C

3. MISE EN PLACE D'UNE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

3.1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

Le développement des outils numériques détaillés doit être accompagné par des études expérimentales afin de valider et d'améliorer les modèles et les simulations. Les études se multiplient sur le sujet de l'étanchéité à l'air et différentes techniques expérimentales pour la caractériser voient le jour. La plus communément répandue consiste à générer un écart de pression entre les deux côtés de la paroi testée et de mesurer le débit induit. L'étanchéité de matériaux ou de compositions de parois peut ainsi être mesurée en laboratoire et celle d'enveloppes de bâtiments existants déterminée avec des systèmes de type Portes Soufflantes (Langmans 2013). Parmi les techniques quantitatives on peut également citer l'étude de l'évolution de la concentration d'un gaz traceur (Labat et al. 2013) et la mesure de l'atténuation d'ondes sonores provoquée par la traversée de la paroi (Iordache et Catalina 2012). Des techniques qualitatives sont également utilisées, telles que la thermographie infrarouge pour identifier les défauts d'étanchéité (Taylor et al. 2002) ou encore l'interférométrie holographique pour visualiser les écoulements résultant d'infiltrations (Peiponen et al. 1986).

Ainsi un certain nombre d'outils sont disponibles pour repérer et quantifier les infiltrations dégradant la perméabilité d'un bâtiment. Le chemin de l'air traversant une paroi contenant des défauts d'étanchéité reste cependant très peu étudié, ce qui rend difficile la validation des modèles numériques. Seules quelques études récentes ont été menées dans ce domaine en implémentant des capteurs de température et d'humidité dans des parois et en créant des atmosphères différentes de chaque côté afin d'induire des transferts couplés d'air, de chaleur et d'humidité (Desmarais et al. 2000). Comprendre ce chemin d'air dans l'isolant est primordial, car il permet notamment de prévoir des pathologies liées à l'humidité, majorées par le flux d'air humide.

Le banc d'essai en cours de conception au LOCIE s'inscrit dans cette perspective. Il a pour objectif de définir la répartition quantitative du flux d'air pour différents types de défauts et de parois. Les données ainsi obtenues permettront de caractériser localement les défauts d'étanchéité et serviront par ailleurs à alimenter et valider la modélisation.

3.2. BANC « TRACÉ DES CHEMINS D'AIR »

3.2.1. Dispositif expérimental

Le banc expérimental en cours d'élaboration est constitué de deux caissons séparés par la paroi testée (cf figure 4). Une symétrie par rapport à cette paroi est observée afin de pouvoir étudier les infiltrations et les exfiltrations sans avoir à la retourner. La circulation de l'air se fait en circuit fermé et est assurée par deux ventilateurs qui, couplés à un variateur de tension, permettent d'imposer des écarts de pression compris entre 5 et 100 Pa. Le dispositif prévoit de tester des parois avec des dimensions maximales de 0,6 m x 2,0 m x 0,5 m (largeur x hauteur x épaisseur).

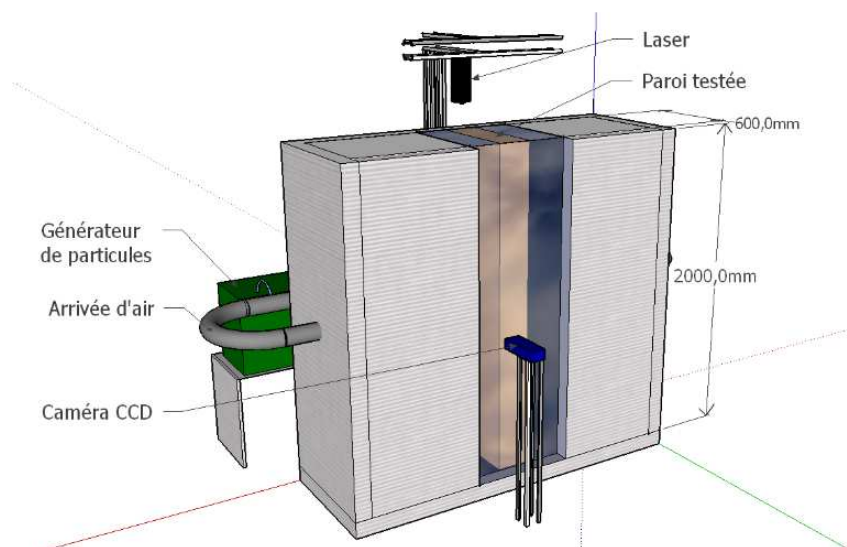


Figure 4 : Schéma de principe du futur banc de tracé des chemins d'air

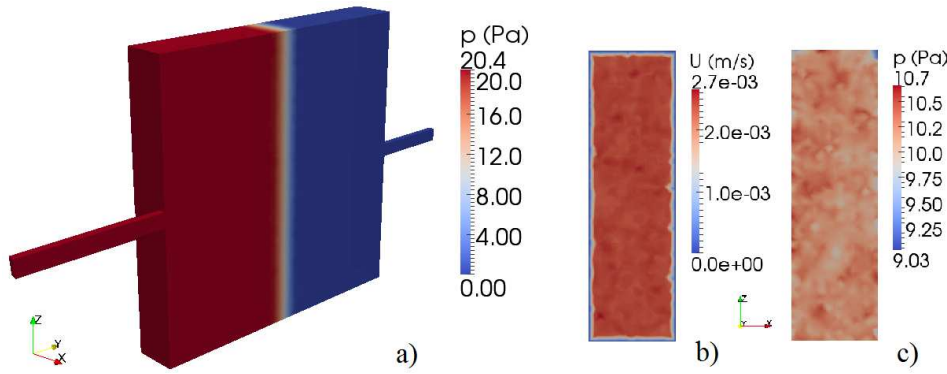


Figure 5 : Champ de pression dans le caisson (a) ; champ de vitesse (b) et de pression (c) sur une coupe verticale du milieu poreux obtenus par simulation sous OpenFoam

Des simulations sous le code CFD OpenFoam ont été effectuées avec un milieu fibreux (porosité de 0,9) comme paroi testée afin d'identifier la géométrie la plus simple à mettre en œuvre expérimentalement qui garantisse des champs de pression et de vitesse proches de l'homogénéité le long de la paroi testée. Les caractéristiques de l'écoulement à l'approche d'un défaut dans la paroi pourront donc être considérées comme identiques quelle que soit sa position sur celle-ci.

3.2.2. Techniques de traçage du chemin de l'air

Une étude par PIV (Particle Image Velocimetry) des champs de vitesses au plus près de la paroi à proximité des défauts d'étanchéité permettra de mettre en évidence les chemins d'entrée et de sortie de l'air dans la paroi. Une surface de la cellule expérimentale sera vitrée afin d'introduire le faisceau laser et de capturer des images de l'écoulement avec la caméra CCD.

Le chemin de l'air à l'intérieur de la paroi sera lui reconstitué grâce à l'injection de microparticules d'uranine (fluorescéine sodée) dans la conduite d'arrivée d'air qui se déposeront dans l'isolant. Cette méthode nécessite ensuite de découper l'isolant en petit volumes et de quantifier dans chacun d'eux la concentration de microparticules par spectroscopie. Une cartographie de la quantité de ces microparticules pourra ainsi être établie, et sera fortement corrélée aux débits d'air locaux. Cette technique a l'avantage de ne pas être intrusive si l'on arrête le flux d'air avant que les particules ne commencent à boucher les pores de l'isolant.

En complément une étude plus habituelle du comportement thermique de la paroi sera effectuée. Pour cela on perturbera l'équilibre en température par l'ajout d'une source chaude en amont de la paroi testée. Dans la période de temps précédant l'établissement d'un nouvel équilibre, il sera alors possible d'étudier les transferts d'air grâce à l'implémentation de capteurs de température quadrillant le volume de la paroi.

Il est à noter que les techniques de la PIV et des microparticules n'ont à la connaissance des auteurs encore jamais été mises en œuvre pour ce type d'application. Afin de valider leur pertinence il était nécessaire de vérifier qu'une épaisseur classique d'isolant (160mm) ne se comportait pas comme un filtre parfait afin qu'une quantité non négligeable de particules réussissent à la traverser. Pour cela le modèle de Mieciet et Gustavsson a été utilisé (Boichot 2005) :

$$\eta_{filtration} = \eta_{interception} + \eta_{impaction} + \eta_{diffusion} + \eta_{interaction\ diffusion / interception} \quad (4)$$

Les résultats du modèle appliqué à une épaisseur de 160 mm de laine de verre (porosité de 0,9 ; fibres de 0,08 μm de diamètre) filtrant des particules d'uranine ($\rho=1500 \text{ kg/m}^3$) présentes dans l'air sont montrés dans la Figure 6. Il apparait que pour des particules de diamètre compris entre 0,1 et 1 μm le coefficient CE représentant le rapport entre la concentration des particules en amont et en aval de l'isolant est inférieur à 2. Ainsi, plus de la moitié des particules entrant dans l'isolant en ressortiront. Pour la PIV, une étude similaire pour des particules d'huile ($\rho=900 \text{ kg/m}^3$) montre que cet intervalle est étendu jusqu'à 1,5 μm . Il semble donc raisonnable de tenter d'appliquer ces techniques dans notre configuration.

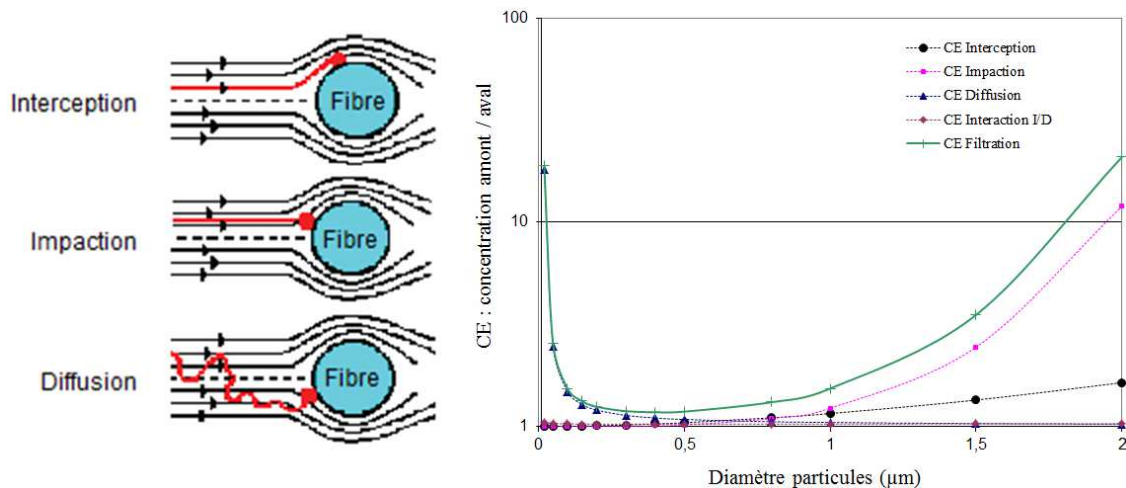


Figure 6 : Efficacité de 160 mm de laine de verre en filtration de particules d'uranine

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un modèle air-chaaleur appliqué à deux configurations de défauts d'étanchéité a été présenté. Les premières comparaisons mesures-simulation ont montré un bon accord sur le champ de température. Depuis, l'humidité a été ajoutée dans le modèle, et une comparaison en régime transitoire avec les résultats expérimentaux est en cours. Le modèle pourra faire l'objet d'une validation grâce aux benchmarks HAMSTAD ainsi que les expériences menées dans le cadre du projet MOBAIR au LOCIE et sur le banc AEV (Air Eau Vent) du CSTB de Grenoble. Le banc expérimental du LOCIE propose également une approche innovante pour visualiser et identifier les chemins de l'air dans les parois grâce à l'utilisation de la PIV et de microparticules traceuses. Une étude préliminaire d'efficacité de filtration a confirmé la pertinence de l'utilisation de ces techniques, et la construction du banc va pouvoir débuter.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Ville et Bâtiments Durables (projet MOB-AIR n° ANR-12-VBDU-0009), ainsi que par l'ADEME et le CSTB.

6. BIBLIOGRAPHIE

Abadie, M.O., E.U. Finlayson, and A.J. Gadgil. 2002. "Infiltration Heat Recovery in Building Walls: Computational Fluid Dynamics Investigations Results". Lawrence Berkeley National Laboratory.

- Balaras, C.A., and A.A. Argiriou. 2002. "Infrared Thermography for Building Diagnostics." *Energy and Buildings* 34: 171–183. doi:10.1016/S0378-7788(01)00105-0.
- Barhoun, Hayssam. 2006. "Influence Des Transferts Aérauliques Dans Les Parois Sur Leurs Performances Thermiques". Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Belleudy, Clément, Ahmad Kayello, Paul Fazio, Monika Woloszyn and Daniel Quenard. 2014. "A Heat-Airflow Model for Simulating the Effects of Air Leakage on the Temperature Field in Porous Insulation." In *10th Nordic Symposium on Building Physics*.
- Boichot, Raphaël. 2005. "Filtration Des Particules Issues Des Moteurs Diesel Par Matrices Fibreuses Plongées Dans Un Champ Électrique " Université de Savoie.
- Bories, Serge, Abdelkader Mojtabi, Marc Prat, and Michel Quintard. 2008. "Transferts de Chaleur Dans Les Milieux Poreux: Conduction, Convection, Rayonnement." *Techniques de L'ingénieur. Génie Énergétique*, no. BE8250. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=21794863>.
- Buchanan, C. R., and M. H. Sherman. 2000. "A Mathematical Model for Infiltration Heat Recovery". Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://www.escholarship.org/uc/item/7vg8m9mk>.
- Iordache, Vlad, and Tiberiu Catalina. 2012. "Acoustic Approach for Building Air Permeability Estimation." *Building and Environment* 57: 18–27. doi:10.1016/j.buildenv.2012.04.008.
- Labat, Matthieu. 2012. "Chaleur – Humidité – Air Dans Les Maisons À Ossature Bois Expérimentation et Modélisation". Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Labat, Matthieu, Monika Woloszyn, Géraldine Garnier, and Jean Jacques Roux. 2013. "Assessment of the Air Change Rate of Airtight Buildings Under Natural Conditions Using the Tracer Gas Technique. Comparison with Numerical Modelling." *Building and Environment*
- Langlais, Catherine, Eric Arquis, and Dave J. McCaa. 1990. "A Theoretical and Experimental Study of Convective Effect in Loose-Fill Thermal Insulation". ASTM International.
- Langmans, Jelle. 2013. "Feasibility of Exterior Air Barriers in Timber Frame Construction". Belgique: KU Leuven.
- Li, Qinru, Jiwu Rao, and Paul Fazio. 2009. "Development of HAM Tool for Building Envelope Analysis." *Building and Environment* 44 (5): 1065–73. doi:10.1016/j.buildenv.2008.07.017.
- Peiponen, K.-E., V.V.K. Karppinen, and R. Varonen. 1986. "The Visualization of Leakage Flow through Building Cracks by Means of Holographic Interferometry." *Optics & Laser Technology* 18: 101–102. doi:10.1016/0030-3992(86)90046-0.
- Saber, Hamed, Wahid Maref, Hakim Elmahdy, Michael Swinton, and Rock Glatzer. 2012. "3D Heat and Air Transport Model for Predicting the Thermal Resistances of Insulated Wall Assemblies." *Journal of Performance Simulation*, 75–91.
- Tariku, Fitsum, Kumar Kumaran, and Paul Fazio. 2010. "Transient Model for Coupled Heat, Air and Moisture Transfer through Multilayered Porous Media." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier edition. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931010001572>.
- Wagner, Helmut. 1989. "Luftdichtkeit und Feuchteschutz (beim Steildach mit Dämmung zwischen den Sparren)." *Deutsche Bauzeitschrift, Heft 12/89*.