



**HAL**  
open science

## **Modélisation des transferts hygrothermiques dans une lame d'air ventilée pour la rénovation du bâtiment ancien humide**

Zakaria Slimani, Wafa Ghrissi, Lorena Freitas Dutra, Geoffrey Promis, Omar Douzane, Anh Dung Tran Le, Thierry Langlet

### ► **To cite this version:**

Zakaria Slimani, Wafa Ghrissi, Lorena Freitas Dutra, Geoffrey Promis, Omar Douzane, et al.. Modélisation des transferts hygrothermiques dans une lame d'air ventilée pour la rénovation du bâtiment ancien humide. XIVème Colloque International Franco-Québécois en énergie (CIFQ2019), ETS, Université de Québec, Jun 2019, Baie Saint Paul, Canada. <hal-04502214>

**HAL Id: hal-04502214**

**<https://hal.science/hal-04502214v1>**

Submitted on 13 Mar 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Modélisation des transferts hygrothermiques dans une lame d'air ventilée pour la rénovation du bâtiment ancien humide

Zakaria **SLIMANI**<sup>1,\*</sup>, Wafa **GHRISSI**<sup>1</sup>, Lorena **FREITAS DUTRA**<sup>1</sup>, Geoffrey **PROMIS**<sup>1</sup>, Omar **DOUZANE**<sup>1</sup>, Anh Dung **TRAN LE**<sup>1</sup> et Thierry **LANGLET**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France

## RÉSUMÉ

Les signes d'humidité dans le logement touchent plus de 20% des ménages en France métropolitaine. Cette nuisance reste le problème numéro 1 de la qualité de l'air dans l'habitat. Outre les désordres structurels, l'humidité est source d'inconfort, voire d'insalubrité (prolifération de l'activité biologique), et constitue généralement un frein aux travaux de rénovation énergétique.

Le présent article propose l'étude des transferts couplés hygrothermiques d'une technique de rénovation innovante, prenant en compte l'interaction entre l'enveloppe du bâtiment, une lame d'air ventilée et l'isolant thermique. Ce dispositif apporte une solution qui répond aux exigences de réduction énergétique et d'amélioration du confort des occupants, tout en assurant la durabilité et l'efficacité de l'isolation thermique et la pérennité de la structure (pas d'assèchement systématique).

**Mots Clés:** transferts couplés hygrothermiques, rénovation énergétique, bâtiments anciens humides, modélisation numérique

## NOMENCLATURE

### Symboles

$T$  : Température [K]

$t$  : Temps [s]

$HR$  : Humidité relative [-]

$p_{v,sat}$  : Pression de vapeur saturante [Pa]

$h_q$  : Coefficient d'échange thermique [W/K.m<sup>2</sup>]

$h_m$  : Coefficient d'échange massique [m/s]

$D_v$  : Coefficient de diffusion d'humidité [m<sup>2</sup>/s]

$D_{v0}$  : Coefficient de diffusion d'humidité dans l'air égale à  $2.61 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s]

$K_L$  : Perméabilité liquide du matériau [m<sup>2</sup>/s]

$C_p$  : Capacité calorifique massique [J/kg.K]

$\vec{J}_v$  : Densité de flux de vapeur d'eau [kg/m<sup>2</sup>.s]

$\vec{J}_q$  : Densité de flux de chaleur [W/m<sup>2</sup>]

$\vec{n}$  : La normale à la surface [-]

$H_{fg}$  : Enthalpie massique de la vapeur d'eau = 2500 [kJ/kg]

$C_m$  : Capacité hydrique [kg/m<sup>3</sup>]

$w$  : La teneur en eau du matériau [kg/m<sup>3</sup>]

$\dot{V}_{Aero}$  : Débit du ventilateur (soufflage/aspiration) [m<sup>3</sup>/s]

$C_{p_{air}}$  : Capacité thermique massique de l'air sec : 1006 [J/kg.K]

$C_{p_v}$  : Capacité thermique massique de la vapeur d'eau : 2050 [J/kg.K]

$C_{p_w}$  : Capacité thermique massique de l'eau liquide : 4180 [J/kg.K]

### Lettres grecques

$\rho$  : Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_a$  : Masse volumique de l'air : 1,2 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau liquide : 1000 [kg/m<sup>3</sup>]

$\lambda$  : Conductivité thermique [W/m.K]

$\rho^v$  : Concentration en vapeur : humidité absolue [kg/m<sup>3</sup>]

### Indices / Exposants :

$a$  : Air

$eff$  : Effectif

$m$  : Massique

$q$  : Thermique  
 $s$  : En surface  
 $V$  : Vapeur  
 $W$  : Eau

Lam : lame d'air  
ext : extérieur  
int : intérieur

## INTRODUCTION

Afin de répondre aux défis environnementaux et climatiques et ainsi de réduire de trois quart les émissions de gaz à effets de serres, le secteur du bâtiment, responsable du quart des émissions polluantes en France, constitue un axe majeur d'amélioration et a donc suscité, ces deux dernières décennies, l'intérêt de nombreux acteurs dans divers domaines pour améliorer l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments.

Outre leurs performances thermiques médiocres, les bâtiments anciens montrent des signes d'humidité qui touchent plus d'un foyer sur cinq en France métropolitaine et plus particulièrement dans les régions du Nord [1]. Touchant avant tout à la qualité de l'air, l'assainissement de ces bâtiments devient, dans certains cas, une urgence sanitaire (apparition de moisissures, de champignons, d'insalubrité) [2].

Actuellement, les solutions utilisées pour pallier les problèmes d'humidité consistent en la réalisation d'une barrière physique limitant la progression de l'eau dans les parois : mise en œuvre d'un film étanche sur les murs, coupure franche du soubassement (cas des remontées capillaires) ou encore installation de drains. Des solutions alternatives sont également apparues sur le marché comme, par exemple, l'injection de résine afin de réduire la porosité du mur ou encore la mise en place d'une polarisation électrique par électrophorèse, électro-osmose... afin de repousser l'eau [3]. Néanmoins, ces opérations sont souvent lourdes et coûteuses et ne donnent pas systématiquement de garanties suffisantes sur le long terme.

Une solution efficace et pérenne n'est à ce jour pas proposée sur le marché de la rénovation énergétique mais des pistes d'études se dégagent : interaction de l'enveloppe du bâti ancien avec son environnement, sensibilité aux changements climatiques qui peuvent entraîner, lors d'une réhabilitation énergétique, la dégradation de l'enveloppe du bâtiment, pouvant parfois conduire jusqu'à son effondrement [4].

Peu de travaux de recherche portent actuellement sur ces sujets de gestion de l'humidité dans une paroi en raison de la complexité des problèmes physiques mis en jeu (transferts couplés de chaleur et d'humidité, aéralique, ...) [5]. Néanmoins, nos voisins européens, également touchés par ces problématiques d'insalubrité, poursuivent actuellement leurs investigations sur deux solutions différentes : l'Université de Stockholm étudie la mise en place d'une double peau ventilée et chauffée [6-9] et le Laboratoire des Physiques de Bâtiments (LFC)

de l'Université d'Ingénieur de Porto propose de ventiler uniquement la base du mur humide [10-14].

Une solution technologique est récemment étudiée afin de permettre une rénovation énergétique durable du bâti, grâce à une gestion active de l'humidité dans les murs à l'aide d'un système aéralique géré de façon intelligente. Ce dispositif (Figure 1), appelé « Aéraulec » [15], est peu énergivore et simple à mettre en œuvre. Il permet de générer une ventilation de la lame d'air entre le mur porteur et l'isolant. Il peut ainsi contribuer aux exigences de réductions de la consommation énergétique des bâtiments tout en assurant le confort des occupants.

Des espaces tampons de faible épaisseur sont aménagés entre chaque mur humide et l'isolation thermique que l'on pose sur ces murs. L'humidité est chassée de chaque espace tampon en remplaçant la totalité de l'air humide qu'il renferme par de l'air neuf prélevé à l'extérieur. Des conduites de soufflage de l'air neuf et d'aspiration de l'air humide sont placées à cet effet dans les espaces tampons, chacune d'elles comportant des petits trous disposés judicieusement.

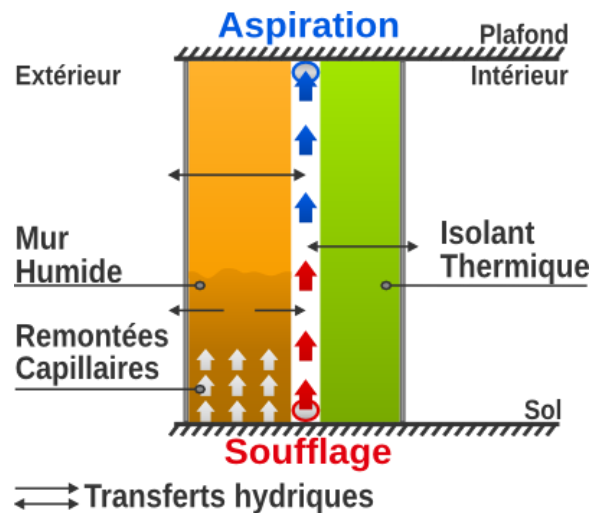


Figure 1 : Schéma du système étudié

### Le système AÉRAULEC

On présente sur la Figure 2 le principe de l'installation du système AÉRAULEC dans un local avec murs humides avant la pose de l'isolation thermique sur ces murs. Il se présente sous forme de deux réseaux de canalisations perforées, un pour le soufflage (rouge) et un pour l'aspiration (bleue). Les canalisations de soufflage sont placées au sol et raccordées à un ventilateur qui

\* auteur correspondant  
Adresse électronique : [zakariaslimani@hotmail.fr](mailto:zakariaslimani@hotmail.fr)

prélève l'air neuf à l'extérieur. Le second réseau d'aspiration est placé au plafond et raccordé à un ventilateur qui rejette l'air chargé d'humidité à l'extérieur.

Le système fonctionne automatiquement au moyen d'un programmeur horaire qui assure quotidiennement la mise en marche des deux ventilateurs.

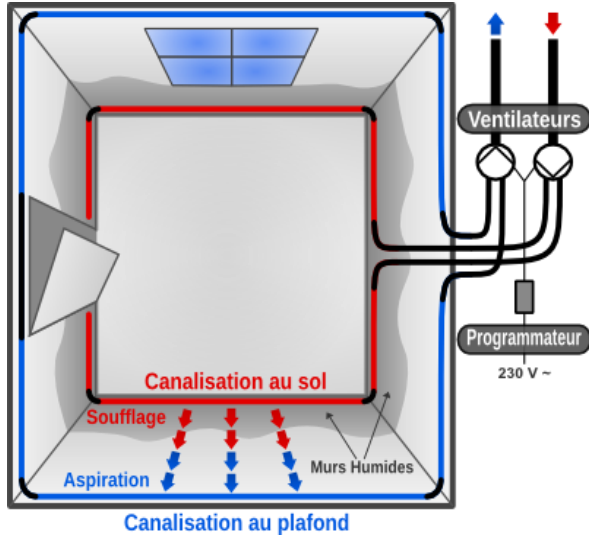


Figure 2 : Principe de l'installation du système AÉRAULEC

## MÉTHODOLOGIE

Afin de dimensionner cette solution, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de transferts y opérants. Pour cela on se propose de modéliser l'ensemble des transferts : thermique (convectif, diffusif, changement de phase), hydrique (adsorption désorption, remontées capillaires, diffusion) et d'aéraulique, tout en prenant compte de l'interaction « mur – lame d'air ventilée – isolant ».

Le modèle proposé se présente sous forme de 2 équations de conservation : de chaleur (1), de masse (2) dans le solide. La formulation physique et mathématique est basée sur les travaux de thèse F. Tariku [16]. Ce modèle macroscopique dérive du modèle de Philip et De Vries [17]. Pour la fermeture du problème (conditions aux limites (5), (6) et (7)), deux autres équations de conservation de chaleur (3) et de masse (4) dans la lame d'air sont considérées. Ces équations fortement couplés, se présentent sous forme d'équations aux dérivées partielles qui seront résolues à l'aide de l'outil de simulation multi-physique COMSOL.

Il est à noter que les potentiels (les variables d'état primaires) retenus sont la température (T) et l'humidité absolue ( $\rho^v$ ).

### Modèle numérique

Conservation de chaleur dans le mur :

$$\rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left( \lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \vec{J}_v H_{fg} - \vec{J}_L C_{pl} T - \vec{J}_v C_{pv} T \right) \quad (1)$$

Conservation de masse dans le mur :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div} \left( -D_v \frac{\partial \rho^v}{\partial x_i} \right) + \text{div} \left( K_L \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (2)$$

Conservation de chaleur dans la lame d'air :

$$V_{\text{lam}} (\rho_a C_p a + \rho_{\text{lam}}^v C_p v) \frac{dT}{dt} = \dot{V} C_p a (T_{\text{ext}} - T_{\text{lam}}) + \dot{V}_{\text{Aero}} C_p v (\rho_{\text{ext}}^v T_{\text{ext}} - \rho_{\text{lam}}^v T_{\text{lam}}) + S_{\text{mur}} h_q (T_{s,\text{iso}} - T_{\text{lam}}) + S_{\text{mur}} h_m (\rho_{s,\text{int}}^v - \rho_{\text{lam}}^v) H_{fg} \quad (3)$$

Conservation de masse dans la lame d'air :

$$V_{\text{lam}} \frac{d\rho_{\text{lam}}^v}{dt} = \dot{V}_{\text{Aero}} (\rho_{\text{ext}}^v - \rho_{\text{lam}}^v) + S_{\text{mur}} h_m (\rho_{s,\text{int}}^v - \rho_{\text{lam}}^v) \quad (4)$$

Conditions aux limites :

- Côté mur brique :

$$\vec{J}_{q,s} \cdot \vec{n} = h_q (T_a - T_{s,\text{mur}}) + H_{fg} h_m (\rho_a^v - \rho_{s,\text{mur}}^v) \quad (5)$$

$$\vec{J}_{m,s} \cdot \vec{n} = h_m (\rho_a^v - \rho_s^v) \quad (6)$$

- Côté isolant :

$$\vec{J}_{q,s} \cdot \vec{n} = h_q (T_a - T_{s,\text{isol}}) \quad (7)$$

Où :

$$h_q = 10 [W/m^2 \cdot K]$$

$$h_m = \frac{h_q}{\rho_a \cdot C_p a}$$

Afin de mettre en avant le potentiel de la solution technique on supposera d'abord, pour cette présente étude, que les coefficients de transferts convectifs thermique et massique sont constants et égaux au coefficient pour le cas de convection naturelle. Il est à noter que le nombre Biot massique  $Bi_m$  pour la brique pour un HR=99,98% est égal à  $24 \times 10^3 \gg \gg 1$ .

Ceci montre que le transfert global massique est contrôlé par le transfert dans l'enveloppe et que la valeur de  $h_m$  ici impacte peu.

Afin d'analyser le potentiel de ce système, on se propose d'étudier la configuration présentée sur la Figure 1 et cela pour différents volumes aérauliques  $\dot{V}_{\text{Aero}}$ .

L'isolant considéré ici est de type polystyrène extrudé d'une épaisseur de 15cm, le mur est en briques traditionnelles pleines, d'une épaisseur de 30cm et l'épaisseur de la lame d'air est supposée de 5cm.

Les propriétés des matériaux utilisés (données d'entrée du modèle), proviennent de la bibliothèque du code Wufi-2D. Ces dernières sont résumées sur le Tableau 1. Pour le moment, l'effet de la température sur l'évolution du coefficient d'absorption des briques est négligé [18].

Enfin, les conditions aux limites hygrothermiques présent en considération représentent des sollicitations en conditions hygrothermiques hivernales, c'est-à-dire avec  $T_{\text{ext}}=10^\circ\text{C}$  et  $\text{HR}_{\text{ext}}=80\%$ .

Tableau 1 : Propriétés hygrothermiques des matériaux

	Brique pleine, traditionnelle	Polystyrène extrudé
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	34
Capacité calorifique massique [J/kg.K]	850	1450
Conductivité thermique [W/m.K]	0.6	0.029
Facteur de diffusion d'humidité à l'état sec [-]	15	
Teneur en eau du matériau saturé [kg/m <sup>3</sup> ]	230	
w(HR) [kg/m <sup>3</sup> ]	HR(%)	w [kg/m <sup>3</sup> ]
	0%	0
	50%	3
	65%	3.4
	80%	4.5
	93%	8.7
	99%	22
	99.7%	32
	99.9%	110
	99.97%	200
100%	230	
KL(w) [m <sup>2</sup> /s]	w [kg/m <sup>3</sup> ]	KL [m <sup>2</sup> /s]
	0	0
	23	0.000000007
	160	0.000000007
	184	0.000000005
	207	0.000000001
230	0.00009	

#### Granularité, méthode et outil de résolution :

Comme mentionné précédemment, les équations aux dérivées partielles non linéaires et couplées qui constituent notre modèle sont résolues simultanément en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des Éléments Finis. La densité de maillage utilisée pour modéliser le mur (solide : brique et isolant) est fine, de type triangulaire, avec 550 éléments coté mur en briques et 278 pour le coté isolant. Enfin, la lame d'air est modélisée par des éléments de type nodaux (un seul nœud dans la lame). Le choix de notre solveur est un solveur de problème instationnaire, et l'analyse des résultats se fera sur la solution à l'équilibre (régime établi), qui est atteint après 350 jours. Le pas de temps utilisé est de 60 secondes.

## RÉSULTATS

La condition aux limites imposée au pied de notre mur ( $HR_{y=0} = 100\%$ ) induit des remontées capillaires mises en exergue sur la Figure 3, résultats de gauche. Les résultats présentés sur la droite mettent en valeur le comportement du mur sans ventilation de la lame d'air entre l'isolant thermique et le mur humide. Dans cette dernière configuration, les niveaux d'humidité relative atteints sont très importants (supérieurs à 90% dans la majorité du mur) et peuvent conduire à un endommagement de la structure et à des transferts d'humidité vers l'intérieur du logement et plus précisément dans l'isolant, entraînant ainsi sa dégradation et une chute de ses performances thermiques. La ventilation de la lame d'air permet ainsi de réduire le taux d'humidité du mur et d'assainir l'isolant en limitant les transferts d'humidité vers

l'intérieur du logement. De cette manière, aucune condensation ne se produira dans l'isolant, assurant ainsi le maintien de ses performances thermiques.

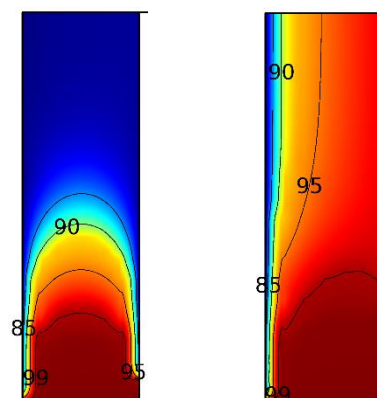


Figure 3 : Contour en HR(%) dans le mur pour le cas sans ventilation (droite) et le cas d'une ventilation de la lame d'air où  $HR_{lam} = HR_{ext}$  (gauche)

Dans un second temps un gradient d'humidité relative est induit suivant la hauteur du mur (voir Figure 4). Les courbes représentent la variation de l'humidité relative HR au milieu du mur suivant la hauteur, pour différents débits de ventilation. On note une même allure pour tous les profils où l'humidité relative varie entre 100% à 0mm et une valeur minimale (autour de 80% d'humidité relative) à 1m de hauteur. L'humidité relative atteinte en tête du mur est fortement dépendante du débit de ventilation  $\dot{V}_{Aero}$ . Néanmoins, deux extrêmes semblent se dégager : pour un débit de ventilation quasiment nul (courbe bleue), l'humidité relative tend vers 96% quand un débit qui tend vers l'infini engendrera une humidité relative proche de l'humidité relative de l'air extérieur ( $HR_{lam} = HR_{ext}$ ).

Le système permet donc au mur d'évacuer une partie de l'humidité issue des remontées capillaires par évaporation et effet succion ou électro-osmose. L'intérêt de la ventilation de la lame d'air, où l'humidité relative pour le cas sans ventilation est comprise entre 95% et 100%, est ainsi mis en lumière.

En effet, dans ce dernier cas, l'absence de ventilation dans la lame d'air bloque les échanges hydriques et entraîne donc une accumulation de l'eau dans le mur (voir la Figure 3).

Cependant, on remarque que les profils ne varient qu'à partir d'un débit  $\dot{V}_{Aero} \geq 0.5kg/h$  et semblent limités pour  $\dot{V}_{Aero} \geq 100kg/h$ .

De ce fait, on peut estimer l'efficacité de notre système par rapport à ces deux courbes par le truchement d'un indicateur d'efficacité  $\varepsilon$ , calculée comme suit :

$$\varepsilon(\dot{V}_{Aero}) = \frac{HR(\dot{V}_{Aero})_{y=1m} - HR(\dot{V}_{Aero \rightarrow 0})_{y=1m}}{HR(\dot{V}_{Aero \rightarrow \infty})_{y=1m} - HR(\dot{V}_{Aero \rightarrow 0})_{y=1m}} \quad (8)$$

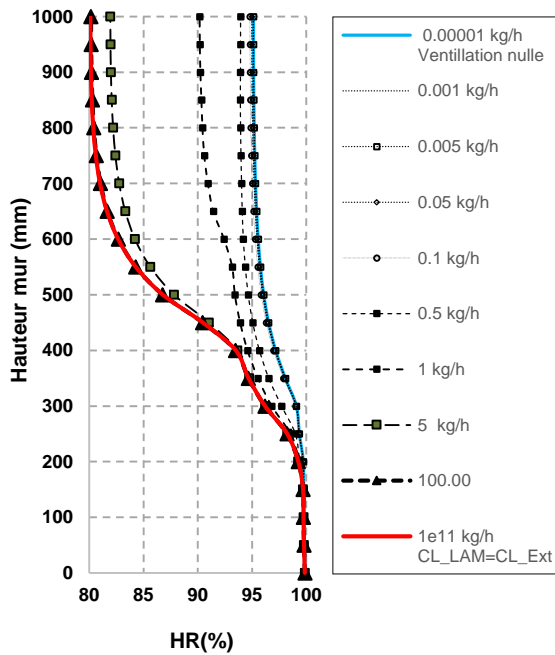


Figure 4 : Niveaux d'humidité relative engendrés sur la hauteur du mur en fonction des débits de ventilation dans la lame d'air

La variation de ce rapport  $\varepsilon$  en fonction de  $\dot{V}_{Aero}$  est présentée sur la figure suivante (Figure 5).

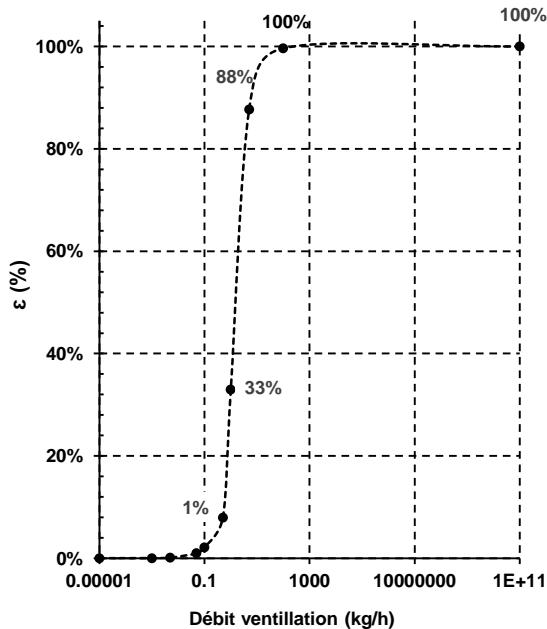


Figure 5 : Variation de  $\varepsilon$  en fonction de  $\dot{V}_{Aero}$

Les résultats confirment les observations précédentes, à savoir que les profils d'humidité relative dans le mur ne varient qu'à partir d'une valeur seuil de

$\dot{V}_{Aero}$  proche de 0.1kg/h. L'efficacité de la ventilation de la lame d'air atteint un niveau de 8% pour une ventilation de 0.5kg/h. De la même manière, la ventilation atteint une limite d'efficacité pour un débit de ventilation proche de 800kg/h. Entre ces deux seuils, l'efficacité de la ventilation est linéairement dépendante du débit de ventilation.

Ces valeurs seuils de débit de renouvellement dépendent naturellement de la capacité de stockage de l'air soufflé (air extérieur) traduit par l'humidité absolue. L'utilisation de l'air intérieur, plus chaud en hiver (lorsque les niveaux d'humidité relative extérieurs sont plus élevés) permettrait sûrement d'améliorer la performance de la ventilation de la lame d'air. En effet, la capacité de stockage de l'humidité de l'air chaud est nettement plus importante que celle de l'air froid. Cette solution reste néanmoins à confirmer par une étude spécifique.

Quant à l'aspect énergétique, on note une amélioration significative en termes de densité de flux de notre mur. En effet, la densité pour le mur avant rénovation est de 18.5W/m<sup>2</sup> et de 2.4W/m<sup>2</sup> avec le système Aéraulec et isolation (valeur maximale pour débit de renouvellement d'air), réduisant ainsi de 86% la déperdition thermique par du mur.

## CONCLUSION

Cette présente étude expose l'analyse des transferts couplés hygrothermiques d'une solution technique de rénovation énergétique du bâtiment humide. La modélisation de cette solution innovante a permis de mettre en avant le potentiel et l'intérêt de la ventilation de la lame d'air entre le mur porteur humide et l'isolation thermique.

D'autre part, l'étude montre que l'efficacité de la ventilation dépend fortement du débit de renouvellement d'air de la lame sur le domaine  $[\dot{V}_{Aero}|_{\varepsilon=1\%}, \dot{V}_{Aero}|_{\varepsilon=100\%}]$ . Ce domaine dépend de l'humidité absolue de l'air utilisé pour l'assainissement et de l'épaisseur de la lame d'air (ainsi que des paramètres de soufflage et d'aspiration tels que les dimensions du réseau ou encore le diamètre et l'espacement des trous). Cette étude réside donc dans une première étape de l'étude et de l'identification des paramètres régissant l'efficacité de la solution Aéraulec afin d'aboutir à l'optimisation du système aéraluc. Ces paramètres seront analysés en profondeur avec l'avancement de notre projet. Par ailleurs, les données numériques doivent être confrontées à un dispositif expérimental afin de confirmer les observations issues de la simulation. Un tel dispositif, à échelle réelle sur une paroi traditionnelle constituée de briques anciennes du XIX<sup>ème</sup> siècle, est actuellement réalisé au sein du laboratoire. Les essais préliminaires de calage de la plateforme expérimental sont achevés et des essais avec et sans le système AERAULEC sont en cours. Enfin,

plusieurs expérimentations *in situ* sont menées, dans le même temps, sur des chantiers de rénovation dans le Nord de la France.

Les premières données expérimentales semblent confirmer l'efficacité du système Aéraulec quant à la limitation l'humidité relative dans le mur et dans la lame d'air (donc dans l'isolant) sans assécher totalement le mur. Le dispositif permet de maintenir un degré d'humidité relative avoisinant les 90%HR, évitant ainsi la formation d'eau sous forme liquide, responsable de l'endommagement de l'isolant thermique.

Toutes ces données (expérimentales, *in situ* et numériques) nous permettront donc d'aboutir à un dispositif efficace et performant, pouvant être mis sur le marché grâce à une étape de transfert de technologie. De plus, la mise en place d'une cellule de mesure expérimentale nous permettra d'identifier les évolutions des coefficients de transferts convectifs thermique et massique afin de les intégrer dans le modèle numérique proposé ici, de manière dynamique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Région Picardie (Hauts-de-France) pour son soutien au travers du financement du Projet de Gestion Active de l'Humidité dans le Bâtiment, et les fonds FEDER pour leur contribution financière au projet.

## RÉFÉRENCES

- [1] Commissariat Général du Développement Durable, L'état du logement en 2010, décembre 2012.
- [2] G. Reboux, A.-P. Bellanger, S. Roussel, F. Grenouillet, and L. Millon, *Moisissures et habitat : risques pour la santé et espèces impliquées*, Bd. 72. 2011.
- [3] E. Franzoni, *State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry*, Journal of Cultural Heritage, vol. 31, pp. S3-S9, 2018.
- [4] N. Sathiparan and U. Rumeskumar, *Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry*, Journal of Building Engineering, vol. 17, pp. 23-31, 2018.
- [5] V. Marincionia, G. Marrab and H. Altamirano-Medina, *Development of predictive models for the probabilistic moisture risk assessment of internal wall insulation*, Building and Environment, vol. 137, pp. 257-267, 2018.
- [6] F. Björk and T. Klintberg, *Air gap method: dependance of water removal on RH in room and height of floor air gap*, Building and Environment, vol. 56, pp. 1-7, 2012.
- [7] T. Klintberg, G. Johannesson and Björk. F., *Air gaps in building construction avoiding dampness and moulds*, Structural Survey, vol. 26, n°13, pp. 242-255, 2008.
- [8] T. Klintberg and F. Björk, *Air gap method: Measurements of airflow inside air gaps of walls*, Structural Survey, vol. 26, n°14, pp. 343-363, 2008.
- [9] T. Klintberg and F. Björk, *Air gap method: Drying of a concrete slab on ground construction*, Structural Survey, vol. 28, n°14, pp. 281-299, 2010.
- [10] A. Guimarães and V. de Freitas, *Wall base ventilation system as a new technique to treat rising damp in existent buildings*, Journal of Building Appraisal, vol. 5, p. 187-195, 2009
- [11] J. Delgado, A. Guimarães and V. de Freitas, *Air drying technologies applied to buildings treatment, Drying and wetting of buildings materials and components*, vol. 4, pp. 1-26, 2014
- [12] A. Guimarães and J. Delgado, *Rising damp in building walls: the wall base ventilation system*, Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 2079-2085, 2012.
- [13] M. Torres and V. de Freitas, *The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings*, Construction and Building Materials, vol. 24, n°18, pp. 1331-1339, 2010.
- [14] M. Torres and V. de Freitas, *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation*, Building Environment, vol. 42, n°11, pp. 424-435, 2007.
- [15] AÉRAULEC - Système aéraulique“. [Online, disponible sur : <http://www.aeraulec.fr/>, accès le 07-Feb-2019]
- [16] F. Tariku, *Whole Building Heat, Air and Moisture Analysis*, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2008.
- [17] J.R. Philip and D.A. De Vries, *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*, Transactions, American Geophysical Union, vol. 38, n°2, p. 222, 1957.
- [18] N. Karagiannis, M. Karoglou, A. Bakolas and A. Moropoulou, *Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials*, Building and Environment, vol. 106, pp. 402-408, 2016.