

Modélisation numérique des phénomènes de transferts hygrothermiques dans des parois humides anciennes ventilées

W. GHRISSI^{*1}, G. PROMIS¹, O. DOUZANE¹, L. FREITAS DUTRA¹, A. D. TRAN LE¹, T. LANGLET¹, A. A. GUIZANI², R. CHOUIKH²

¹ Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne
Avenue des Facultés, 80025 Amiens Cedex 1, France

*wafa.ghrissi@etud.u-picardie.fr

² Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, Université de Tunis El Manar
Technopole Borj Cedria, Tunisie

RESUME. L'évacuation de l'excès d'humidité dans l'enveloppe du bâti ancien grâce à un système de ventilation d'une lame d'air réalisée entre l'isolant thermique et le mur humide porteur est l'une des solutions efficaces pour atteindre le confort des occupants, la pérennité de l'isolant et assainir l'air intérieur. Une nouvelle approche mathématique d'analyse de l'influence des paramètres effectifs sur la performance d'évaporation d'une couche poreuse saturée en eau due aux remontées capillaires est présentée. Ce modèle mathématique tient compte des caractéristiques de transferts simultanés de chaleur et de masse dans l'air ambiant et dans le milieu poreux saturé dont le modèle corporatif dans la région poreuse est de type darcien. Un couplage hybride associant à la fois la méthode de Boltzmann sur réseau non uniforme à la méthode des volumes finis est proposé. La méthode Lattice-Boltzmann est utilisée pour évaluer le champ de vitesses tandis que la méthode des volumes finis est appliquée pour le champ de températures.

MOTS-CLÉS. Humidité, Transferts hygrothermiques, Rénovation, Modélisation numérique

ABSTRACT. The evacuation of the excess humidity in the envelope of the old building thanks to a ventilation system of an air space produced between the thermal insulation and the humid supporting wall is one of the effective solutions to reach the comfort of the occupants, the durability of the insulation and cleaning up the indoor air. A new mathematical approach to analyze the influence of effective parameters on the evaporation performance of a porous layer saturated with water due to capillary rise is presented. The mathematical model takes into account the characteristics of simultaneous heat and mass transfers in the ambient air and in the saturated porous medium whose corporate model in the porous region is the Darcian model. A hybrid coupling combining both the Boltzmann method on a non-uniform network and the finite volume method is proposed. The Lattice-Boltzmann method is used to determine the velocity field while the finite volume method is applied to establish the temperatures field.

KEYWORDS. Moisture, Heat and moisture transfers, Renovation, Numerical modelisation

1 INTRODUCTION

Dans la région Hauts-de-France, comme dans le reste de la France, le bâti ancien (antérieur à 1974, date du premier choc pétrolier) représente environ la moitié des bâtiments existants ; 20% d'entre eux montrent des signes d'humidité. La présence excessive de l'humidité, soit au niveau de l'ambiance habitable, soit au niveau de l'enveloppe du bâtiment, induit l'apparition de plusieurs pathologies qui sont dues soit à l'action directe de l'humidité (la condensation à la surface des parois, dégradation des propriétés thermiques et mécaniques des parois par remontées capillaires) soit à une action indirecte où les conditions hygrométriques environnementales représentent un milieu favorable à l'apparition et au développement de l'activité biologique. Dans ce sens plusieurs projets de recherche ont été réalisés sur le comportement hygrothermique du bâti ancien qui compte parmi les bâtiments les plus vulnérables face aux risques liés

à l'humidité (Ferroukhi (2015), Künzel (1995), Claude (2018)). Afin de rénover ce patrimoine, plusieurs solutions sont présentées sur le marché français. Néanmoins ces solutions sont coûteuses et provisoires-CoDEM (2020). C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de recherche intitulé "Gestion Active de l'humidité dans le Bâtiment" qui présente une alternative efficace afin d'évacuer l'excès d'humidité sans assécher les parois. Le concept consiste à ventiler un espace tampon de faible épaisseur créé entre la paroi humide et l'isolation thermique intérieure. La circulation de l'air est assurée par un réseau de soufflage d'air - prélevé à l'extérieur du logement - placé en pied de mur, et d'un réseau d'aspiration d'air humide placé en tête de paroi. Ainsi, notre démarche vise à étudier l'influence des paramètres effectifs d'air entrant dans l'espace tampon cloisonné entre la paroi et l'isolant thermique sur la réponse hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment en briques anciennes de terre cuite. Le modèle mathématique a été élaboré et développé sur Fortran, logiciel de simulation numérique adapté aux problèmes complexes différentiels. Enfin, les résultats de simulation sont analysés et discutés.

2 DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE

2.1 DESCRIPTION DU PROBLÈME PHYSIQUE

Le modèle physique étudié ici se base sur une configuration schématique simplifiée similaire à l'approche de (Sellami (2019), Sellami et al. (2018) et (Oulaid et al. (2010)) en considérant un canal vertical composé de deux plaques parallèles de longueur L ($L=1.5\text{m}$) séparées d'une distance H , voir figure [1]. La plaque de gauche représente la paroi humide saturée en eau, d'une épaisseur d ($d=0.35\text{m}$), quand la plaque de droite représente l'isolant thermique sec maintenu dans des conditions adiabatiques. Le canal qui représente la lame d'air d'une épaisseur de H ($H = 0.03\text{m}$), est traversé par un flux laminaire ascendant d'air insufflé à température constante (T_0), et à une humidité relative (ϕ_0) et une vitesse (U_0) uniforme. L'objectif est d'étudier les phénomènes d'évaporation en surface du mur humide, côté lame d'air ventilée. Ainsi, en premier lieu, la face extérieure du mur est considérée isolée (thermiquement et hygriquement) pour simplifier le modèle où les interactions avec l'environnement extérieur seront prises en considération ultérieurement.

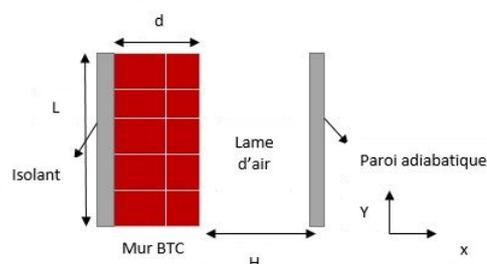


FIGURE 1. Description simplifiée du modèle.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération lors de la formulation mathématique du problème :

- Le flux laminaire est considéré stationnaire (la valeur maximale de débit imposé de soufflage est inférieure 2000 Reynolds).
- Le problème est bidimensionnel et constant.
- Les mélanges de gaz et de vapeur du film liquide sont idéaux pour les champs de pression modélisés, relativement faibles.
- Le transfert de chaleur par rayonnement et la dissipation visqueuse sont négligeables. Les transferts radiatifs sont négligeables en raison de la différence de température relativement faible à l'interface entre la paroi poreuse et le fluide.(Sellami et al. (2018))
- Les effets Dufour et Soret représentant respectivement le flux de chaleur sous l'effet du gradient de masses et de la diffusion de masse sous le gradient de températures peuvent être négligés car les processus de diffusion des espèces se produisent à un niveau de concentration très faible. Les transferts de chaleur et de masse sont principalement dus à l'évaporation.(Sellami (2019))
- Le milieu poreux saturé en liquide est considéré isotrope et homogène; les propriétés locales du milieu poreux sont définies à l'échelle du volume élémentaire représentatif, où le milieu est

supposé être macroscopiquement homogène. Ainsi, pour les aspects thermiques locaux, l'hypothèse d'équilibre reste valable. (Saidi (2018))

— L'interface entre le liquide et l'air est invariante à la surface de la couche poreuse.

2.1.1 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME ET CONDITIONS AUX LIMITES

A partir des hypothèses formulées précédemment, l'écoulement laminaire du fluide par convection forcée dans la lame d'air peut être décrit par les équations de continuité bidimensionnelle, le transfert de l'énergie et la quantité de mouvement. Dans la couche poreuse saturée, le modèle de Darcy s'écrit alors :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p v T)}{\partial x} = \alpha_e \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$-\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

Les conditions aux limites associées à ce problème sont définies comme suit :
pour $y = 0$; $0 < x < d$:

$$v = v_{inlet} \quad (4)$$

$$T = T_{eau} \quad (5)$$

pour $y=0$; $d < x < H$:

$$u = 0; v = v_0; T = T_0; C = C_0 \quad (6)$$

pour $x = H$, $y = L$ et $x=0$, $Y= L$ et $y = L$ et $0 < x < d$:

$$u = v = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

pour $y=L$ et $d < x < H$:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

pour $x = d$ et $y = L$:

$$-\alpha_e \frac{\partial T_{eau}}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_{air} D l_v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (10)$$

$$u_{air} = -\rho_{air} D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (11)$$

$$v_{air,interface} = v_{eau,interface} \quad (12)$$

$$T_{eau,interface} = T_{air,interface} \quad (13)$$

2.1.2 MÉTHODE DE RÉOLUTION NUMÉRIQUE

Le système d'équations différentielles couplée, sous réserve du respect des conditions aux limites, est résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis. Le couplage vitesse - pression est traité par la méthode de Lattice - Boltzman, proposée par (Patankar (1980)). L'ensemble résultant d'équations de discrétisation peut alors être converti dans une équation matricielle tri diagonale et résolu de manière itérative sur Fortran. L'organigramme du code numérique est le suivant :

1. Implémentation des paramètres thermodynamiques de l'eau et l'air ;
2. Détermination des valeurs estimées des champs dynamiques dans le milieu poreux et dans la lame d'air ;
3. Calcul de la pression dans le milieu poreux ;
4. Calcul des composantes des champs de vitesses et de températures dans le milieu poreux ;

5. Calcul des champs dynamiques, thermique et massique, dans la lame d'air ;
6. Test de convergence ;
7. Affichage des résultats.

Un cas similaire a précédemment été étudiée par (Sellami et al. (2018)) où les auteurs ont cherché à modéliser les phénomènes d'évaporation et de condensation à l'interface entre une couche céramique saturée et un canal ventilé. L'air insufflé entre dans le canal à une température de 35° et un taux d'humidité relative de 30%. Cette configuration est reproduite grâce la formulation mathématique présentée ici afin de comparer les résultats numériques obtenus.

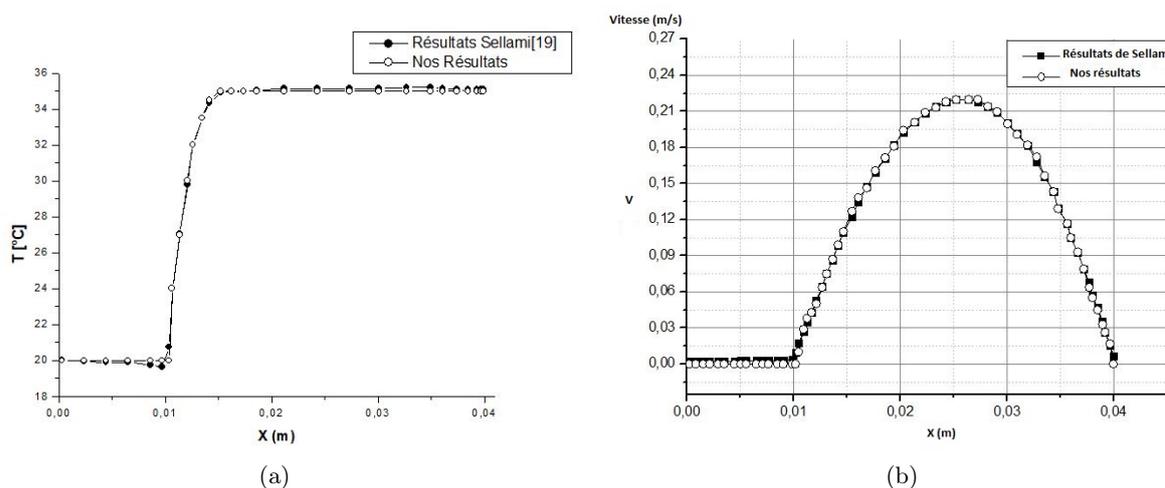


FIGURE 2. validation du modèle Numérique : Distribution axiale de la vitesse et de la température dans la couche poreuse et dans le canal.

La figure 2 présente l'évolution de la température (a) et la vitesse d'air (b) dans le canal ventilé. Nous constatons d'après la figure 2 une bonne concordance entre nos résultats et ceux de (Sellami et al. (2018)) en calculant l'erreur relative inférieure à 1%, tant en température qu'en vitesse d'air. Le profil de vitesse axiale est illustré à la [figure 2(b)] confirme un écoulement laminaire dans le canal.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse numérique de l'influence des conditions hygrothermiques de l'air insufflé est présentée au travers des champs d'humidité absolue dans la lame d'air et des profils de températures dans le milieu poreux.

3.1 CHAMPS D'HUMIDITÉ ABSOLUE DANS LA LAME D'AIR

Les couples [température ; humidité relative] de l'air insufflé sont initialement considérés égaux à $[5^\circ\text{C} ; 95\%]$, puis $[20^\circ\text{C} ; 50\%]$, et, dans un dernier cas, $[35^\circ\text{C} ; 30\%]$. La vitesse de l'air à l'entrée de la lame d'air initialement prise égale à 0.01 m/s

Les figures 3 et 4 illustrent l'évolution longitudinale de l'humidité absolue dans la lame d'air pour les différentes conditions d'entrée d'air. On remarque que les profils de distribution de l'humidité absolue sont similaires dans les trois cas : pour le cas présenté dans la figure (3), où une entrée d'air sous conditions hivernales ($[5^\circ\text{C} ; 95\%$ d'humidité relative]) équivalant à une humidité absolue de 5.5 g/kg est modélisée, on constate une distribution longitudinale décroissante d'humidité absolue tout au long de la lame d'air, passant de 5.5g/kg à l'entrée à 4.8 kg/kg à la sortie. Ceci s'explique par un phénomène de condensation de vapeur d'eau sur la face interne de la paroi humide. Dans le cas (4a) où l'air insufflé correspond à des conditions estivales ($[35^\circ\text{C} ; 30\%$ d'humidité relative] soit 11 g/kg d'humidité absolue), on note un accroissement longitudinal d'humidité absolue dans le canal. L'humidité absolue évolue de 11 g/kg à 35 g/kg. Les mêmes conclusions peuvent être formulées pour le cas (4b) avec des conditions d'entrée d'air à $[20^\circ\text{C} ; 50\%$ d'HR] équivalentes à 7.5 g/kg où on évalue, à la sortie du canal, une humidité absolue égale

à 14 g/kg. Ceci se justifie par le phénomène d'évaporation en surface. En effet, l'apport de chaleur sur la surface intérieure de la paroi humide provoque une augmentation de concentration de vapeur d'eau surfacique. Il en résulte donc une évaporation d'autant plus intense que le gradient de température est élevé.

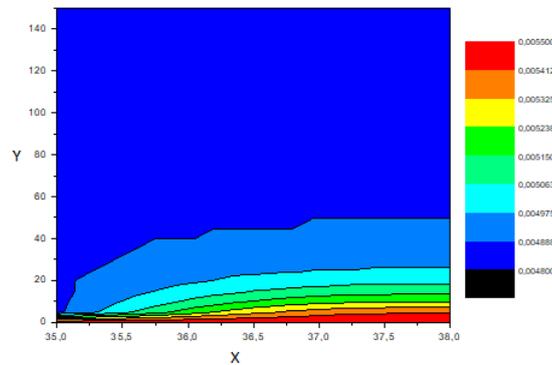


FIGURE 3. champs d'iso-concentration dans la lame d'air à 5°C et 95% d'humidité relative

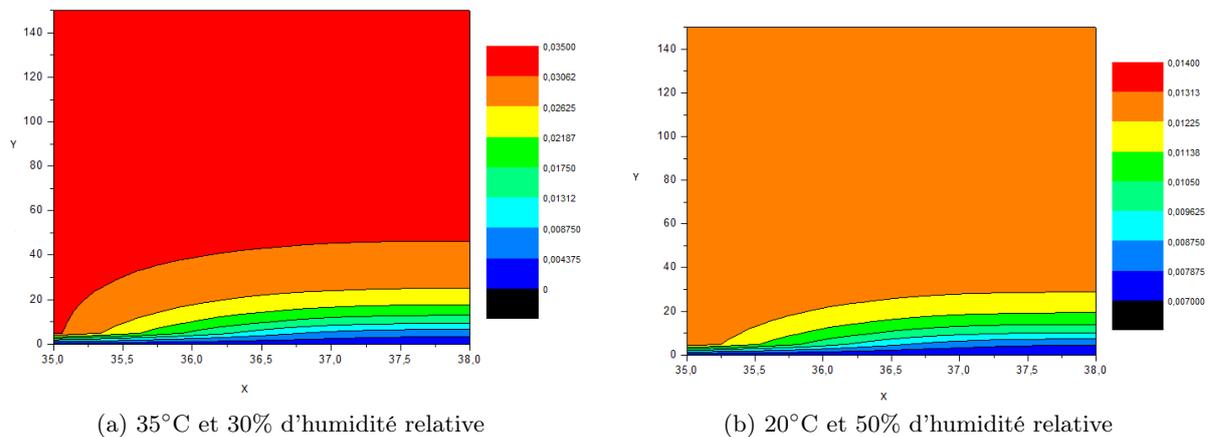


FIGURE 4. Champs d'iso-concentration dans la lame d'air sous différentes conditions d'entrée d'air insufflé

3.2 PROFIL DE TEMPÉRATURES DANS LE MILIEU POREUX

La figure 5 illustre l'évolution longitudinale de la température dans le milieu poreux pour différentes températures d'air insufflé dans la lame d'air ventilée. Dans le premier cas (5°C ; 95% HR), la température de la paroi diminue progressivement lorsque l'on s'éloigne de la surface "chaude" pour tendre vers une valeur sensiblement constante et proche de la température de l'air ambiant (équilibre thermique). Cette diminution de la température de surface interne de la paroi est due aux actions couplées des transferts de chaleur et de masse par convection entre la paroi et la lame d'air. Cette baisse de température par rapport à la température initiale de l'eau montre que la quantité de chaleur apportée par conduction à travers cette paroi et la convection par l'air est inférieure à la quantité de chaleur utilisée pour évaporer de l'eau liquide de surface (Saidi (2018)). Dans le second cas (35°C ; 30% HR), la température augmente pour atteindre une valeur proche de celle de l'air s'écoulant au voisinage. L'accroissement semble fortement gouverné par la température d'air entrant. On remarque aussi que la différence de température entre la paroi poreuse et l'air est plus accentuée en pied de mur ($y < 1\text{m}$), symbole de l'importance des transferts convectifs au voisinage de l'entrée de la cavité ventilée. Le dernier cas (20°C ; 50% HR) montre en revanche pas d'évolution de la température à l'interface, résultat attendu au regard des conditions limites de la paroi humide (maintenue en conditions adiabatiques à 20°C) et de la sollicitation thermique par l'air insufflé (20°C également). L'équilibre thermique initial est ici conservé.

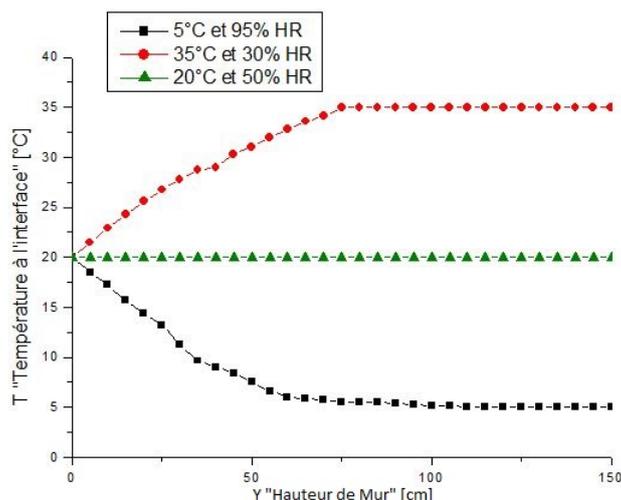


FIGURE 5. Profils de température à l’interface entre le milieu poreux et la lame d’air ventilée pour les différentes conditions hygrothermiques d’air entrant

4 CONCLUSION

Au travers de cette étude numérique, nous avons analysé l’influence de la température et de l’humidité relative de l’air insufflé dans une cavité ventilée créée entre un isolant thermique et une paroi poreuse humide saturée. Cette solution est proposée afin de lutter contre les effets néfastes des remontées capillaires dans le patrimoine ancien. Les principaux résultats montrent que l’augmentation de l’humidité relative de l’air insufflé à l’entrée de la lame d’air entraîne une diminution des transferts par mode latent. De plus, l’augmentation de la température provoque une augmentation des transferts de chaleur par mode latent et sensible. Des dispositifs expérimentaux, à échelles réelle et réduite, ont été créés pour valider expérimentalement le modèle numérique formulé. Ces dispositifs expérimentaux reproduisent les remontées capillaires dans une paroi en briques anciennes. Le dispositif de ventilation sera ensuite équipé et lourdement instrumenté afin d’identifier le comportement de la paroi complexe à l’échelle macroscopique.

RÉFÉRENCES

- Claude, S. (2018). *Etude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- CoDEM (Consulté le 13 octobre 2020). Le BATLAB - “Humidité dans la construction”. <http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/>.
- Ferroukhi, M. Y. (2015). *Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : Evaluation des désordres causés par l’humidité*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart, 65.
- Oulaid, O., Benhamou, B., et Galanis, N. (2010). Combined buoyancy effects of thermal and mass diffusion on laminar convection in a vertical isothermal channel. *Computational Thermal Sciences*, 2(2) :125–138.
- Patankar, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Electro Skills Series. Hemisphere Publishing Corporation.
- Saidi, M. (2018). *Etude des transferts hygrothermiques dans un matériau écologique*. PhD thesis, Université de Perpignan Via Domitia.

- Sellami, K. (2019). Direct evaporative cooling performance of ambient air using a ceramic wet porous layer. *Chemical Engineering Research and Design*, 142 :225–236.
- Sellami, K., Labsi, N., Feddaoui, M., Oubella, M., Benkahla, Y., et Najim, M. (2018). Comparative study of reversal flow during the evaporation or condensation of water and ethanol film in a vertical channel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(5) :1421–1432.