

Influence des paramètres multi-physiques des matériaux biosourcés sur la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiments

W. GHRISSI^{*1}, G. PROMIS¹, O. DOUZANE¹, T. LANGLET¹, 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. Dans le cadre de la rénovation énergétique durable des bâtiments anciens et afin d'améliorer l'efficacité énergétique des parois soumises aux remontées capillaires, une nouvelle technologie de rupture consiste à incorporer un système de ventilation dans un espace tampon situé entre l'isolation thermique et l'ossature porteuse humide. Cette technologie est considérée comme l'une des solutions efficaces et peu onéreuses pour lutter contre les remontées capillaires, tout en assurant la pérennité de l'isolation et la durabilité structurelle de l'ossature porteuse. Une étude numérique de simulation des transferts de masse et de chaleur est menée, considérant un canal ventilé dont l'une des parois verticales est composée de briques en terre cuite et l'autre paroi représente un isolant hygroscopique avec un pare vapeur. Les transferts hygrothermiques dans la paroi, assimilée à un milieu poreux non saturée, et dans le canal ventilé sont décrits respectivement par le modèle hygrothermique de Luikov additionné des équations fondamentales de la convection forcée. Ces équations de transferts sont résolues par une méthode implicite à la méthode hybride combinant à la fois la méthode de Lattice – Boltzmann, la méthode des volumes finies et la méthode itérative de surrelaxation ponctuelle. L'objectif est d'étudier la sensibilité du modèle de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité vis-à-vis de la précision des mesures des propriétés hygrothermiques des matériaux. Afin d'identifier les paramètres les plus influents sur la réponse hygrothermique des enveloppes de bâtiments.

MOTS-CLÉS. Bâtiments anciens, Transferts hygrothermiques, Rénovation, Modélisation numérique

ABSTRACT. As part of the sustainable energy renovation of old buildings and in order to improve the energy efficiency of walls subject to capillary rise, a new breakthrough technology consists of incorporating a ventilation system in a buffer space located between the thermal insulation and the damp supporting structure. This technology is considered to be one of the most effective and inexpensive solutions to combat capillary rise, while ensuring the durability of the insulation and the structural durability of the supporting structure. A numerical study of mass and heat transfer simulation is carried out, considering a ventilated channel where one of the vertical walls is composed of clay bricks and the other wall represents a hygroscopic insulation with a vapour barrier. The hygrothermal transfers in the wall, assimilated to an unsaturated porous medium, and in the ventilated channel are described respectively by the hygrothermal model of Luikov added to the fundamental equations of forced convection. These transfer equations are solved by a method implicit to the hybrid method combining at the same time the Lattice - Boltzmann method, the finite volume method and the iterative method of point over-relaxation. The objective is to study the sensitivity of the developed coupled heat, air and moisture transfer model with respect to the accuracy of measurement of hygrothermal properties of materials. In order to identify the most influential parameters on the hygrothermal response of building envelopes.

KEYWORDS. Old building, Heat and moisture transfers, Renovation, Numerical modelisation

1 INTRODUCTION

Le parc français de bâtiments existants compte deux tiers de logements construits selon un mode constructif industrialisé antérieur à 1975, dont un tiers a été construit avant 1948, date correspondante à la deuxième guerre mondiale (ADEME (2020)). Ce dernier représente le patrimoine ancien et est basé sur un mode constructif traditionnel. Il est considéré comme un héritage culturel à la vue de sa richesse architecturale. Ce parc est principalement construit à base des matériaux locaux, généralement biosourcés, qui lui confère une forte inertie thermique (Claude (2018)). Cependant, son inconvénient majeur réside dans sa forte sensibilité à l'humidité. En effet 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 d'ordre structurelles et d'insalubrité (Berger (2014)), (Torres et de Freitas (2007)), (Viitanen et al. (2010)). Plusieurs stratégies de rénovation de ce parc patrimonial sont proposées afin d'améliorer ses performances énergétiques. Néanmoins ces solutions sont onéreuses et leur durabilité n'est pas garantie à long terme. Ainsi, note projet, intitulé " Gestion Active de l'humidité dans le bâtiment " s'inscrit dans ce contexte nous proposons une solution efficace pour l'évacuation de l'excès d'humidité sans assèchement de la paroi (Promis (2021)). La technologie 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. Le modèle numérique élaboré des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les enveloppes de bâtiments est basé sur une description phénoménologique des transferts hygrothermique à une échelle macroscopique. Ce type de modélisation fait appel à des données d'entrée déterminées expérimentalement. Par conséquent, une bonne prédiction du comportement hygrothermique au niveau de la paroi est fortement tributaire du degré de précision des paramètres d'entrée du modèle déterminés expérimentalement (Ferroukhi (2015)). Ainsi, cet article présente une étude de sensibilité menée face à la variabilité des paramètres d'entrée du modèle sur la prédiction du comportement hygrothermique des parois constituant l'enveloppe du bâtiment. Basée sur une méthode d'analyse locale, cette approche consiste à évaluer quantitativement la réponse du modèle par rapport à une variation d'une unique donnée d'entrée (la porosité, performance thermique et diffusion hygrique). Les résultats sont analysés par comparaison avec une simulation de référence, dont les caractéristiques ont été mises en évidence. Les résultats sont présentés en termes de distributions de température et de teneur en eau pour la paroi, de champs d'isothermes et d'iso-concentration de vapeur d'eau, variables primitives, et de nombres adimensionnés, Nusselt et Sherwood locaux, pour identifier la nature des échanges à l'interface entre la paroi humide et l'espace tampon ventilé. 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 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Cette article s'intéresse à évaluer quantitativement la réponse du modèle par rapport à une variation d'une unique donnée d'entrée (la porosité, performance thermique et diffusion hygrique) et sur la performance du canal ventilé adossé à une paroi partiellement saturée en conditions diabatiques, en régime permanent établi (soit après 64 jours). On maintient les conditions hygrothermiques de soufflage à 20°C et 50% d'humidité relative, ainsi que l'ambiance externe fixe, à 10°C et 70% d'humidité relative. La vitesse de soufflage est fixée à 1mm/s.

2.1 IMPACT DE LA POROSITÉ DE LA PAROI HUMIDE

La porosité de l'ossature porteuse est fortement dépendante de la nature hétérogène des matériaux la constituant. Cette caractéristique est également délicate à déterminer expérimentalement et a une influence significative sur les phénomènes de transport de chaleur et de masse, notamment au regard de la tortuosité et de la taille du réseau poral. De plus, lors de la modélisation du comportement d'une paroi, l'identification de cette caractéristique ne peut être entreprise au travers d'un prélèvement d'échantillon, essai destructif. Cette opération délicate n'est pas toujours possible et il convient alors d'évaluer la pertinence de telles investigations sur les résultats numériques. Ainsi, afin d'établir la sensibilité du modèle numérique face à ce paramètre, trois études sont menées, dans des conditions strictement identiques, en faisant varier la porosité du mur porteur de 0.1, 0.3 et 0.5 (soit $\pm 70\%$ de la porosité mesurée de la brique de terre cuite).

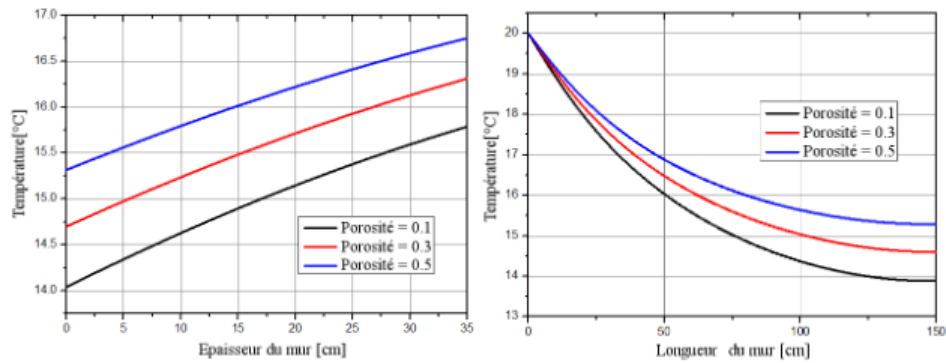


FIGURE 1. Évolutions de la température au sein du mur humide au regard de la porosité

La figure 1 illustre l'influence de la variation de la porosité de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au cœur de la paroi. Les valeurs correspondantes à une porosité de 0.3 sont considérées comme références. Une variation de la porosité de $\pm 70\%$ entraîne une modification $\pm 0.75^\circ\text{C}$ sur le profil de température du mur à mi-hauteur, ce qui correspond à un écart relatif de 5%. De la même manière, l'évolution de la température en fonction de la hauteur de la paroi est sujette à une modification maximale (en tête de paroi) de 0.75°C . Les conditions limites, imposées en pied de mur, justifient les températures identiques selon les trois cas d'études considérés. L'incertitude d'estimation de la porosité ne semble pas gouverner des modifications fondamentales des profils de distribution de la température dans l'ossature porteuse. Néanmoins, l'augmentation de la porosité de la paroi humide conduit à des températures supérieures. Ceci peut s'expliquer par l'accroissement des gradients thermiques interfaciaux, gouvernant les transferts thermiques entre le milieu poreux et le canal d'air ventilé. De plus, même si les conditions limites en pied de mur imposent une température fixe, les échanges entre l'air humide et le milieu poreux sont freinés par la faible porosité de la paroi. Ceux-ci semblent toutefois atteindre un comportement asymptotique à partir d'une hauteur de 1.3m, limitant les divergences entre les trois cas de porosités étudiées.

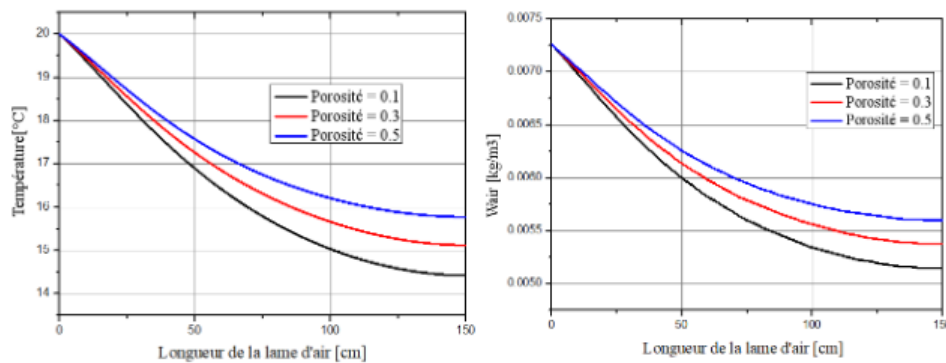


FIGURE 2. Évolutions de la température au sein de la lame d'air au regard de la porosité

La figure 2 présente l'influence de la variation de la porosité du milieu poreux sur les profils axiaux de température et de concentration de vapeur dans la lame d'air. Les distributions axiales de la température de l'air et sa concentration en vapeur d'eau dans la lame d'air diminuent en allant de l'amont vers l'aval du canal, mais cette diminution est moins importante lorsque la porosité du milieu poreux est assez élevée. En effet, l'augmentation de la température de l'air dans la lame d'air ventilée engendre une augmentation de la pression de vapeur d'eau saturante, permettant ainsi à l'air de contenir une concentration de vapeur d'eau plus importante. L'augmentation de la porosité du milieu porteur augmente sa perméabilité à la vapeur d'eau, ce qui explique l'augmentation de l'humidité absolue dans la lame d'air. Néanmoins, de la même manière que précédemment, la variation de la porosité engendre une modification de la température de l'air de l'ordre de 0.7°C , soit un écart relatif de 5%, du même ordre de grandeur que l'écart relatif sur la concentration de vapeur d'eau ($5.4 \pm 0.2\text{g/m}^3$).

Afin d'interpréter la sensibilité des transferts hygrothermiques à la porosité de la paroi humide, les nombres adimensionnés de Nusselt et Sherwood sont investis. Le nombre Nusselt local caractérise le type

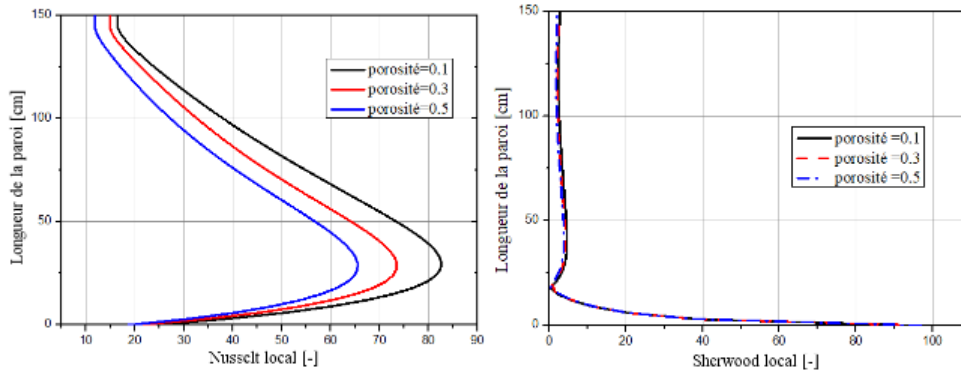


FIGURE 3. Évolutions de nombre de Nusselt et Sherwood au regard de la porosité

de transfert thermique entre le fluide (l'air dans le canal) et la paroi. Il renseigne sur le rapport entre le transfert par convection et le transfert par conduction. Le nombre de Nusselt est d'autant plus élevé lorsque la convection prédomine sur la conduction. Le nombre de Sherwood, quant à lui, représente le rapport entre les transferts de masse par convection et les transferts par diffusion. Il est d'autant plus important lorsque la convection l'emporte sur la diffusion. Les évolutions des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux au regard de la porosité sont présentées en figure 3. Plus la porosité de la paroi est élevée, plus les échanges thermiques entre la paroi et le fluide, traduits par le nombre de Nusselt local, sont importants. En effet, en pied de mur, là où les échanges thermiques sont importants, le nombre de Nusselt local atteint 65 à 82, en fonction de la porosité considérée. Cette valeur traduit des échanges par convection entre la paroi humide et le canal ventilé. En revanche, les transferts massiques, représentés par le nombre de Sherwood local, semblent être faiblement influencés par la porosité. Ainsi, la modification de la concentration en vapeur d'eau au sein de la lame d'air ventilée semble être pilotée par la variation de la température, elle-même gouvernée par les phénomènes convectifs à l'interface entre la paroi et la lame d'air ventilée. Ces phénomènes convectifs dépendent pour partie de la porosité de la paroi. L'augmentation de la température engendre un accroissement de la capacité de stockage de l'humidité dans l'air, responsable de la progression de la concentration massique de vapeur d'eau. La porosité semble impacter directement les phénomènes de transferts hygriques à l'interface entre la paroi humide et la lame d'air ventilée sans modifier la nature des échanges hygrothermiques.

2.2 IMPACT DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE L'ENVELOPPE

Le modèle élaboré de transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment est basé sur une description phénoménologique des transferts hygrothermiques à l'échelle macroscopique. Cette approche de conception de modèle fait appel à des données d'entrée déterminées expérimentalement, et notamment les propriétés thermiques des matériaux telles que la conductivité thermique et la capacité thermique. Par conséquent, une bonne prédiction du comportement hygrothermique au niveau de la paroi est alors fortement tributaire du degré de précision dans l'identification de ces paramètres d'entrée du modèle. Or, les approches expérimentales montrent de fortes disparités de propriétés, même au sein de matériaux identiques. Ainsi, trois études sont menées, dans des conditions climatiques identiques, en faisant varier la conductivité thermique du mur porteur de 0.35W/m.K, 0.45W/m.K et 0.55W/m.K et la capacité thermique de 700J/K.kg, 800J/K.kg et 900J/K.kg, respectivement.

La figure 4 illustre l'influence de la variation des propriétés thermiques de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au cœur de la paroi. La variation des propriétés thermiques de la structure porteuse n'a un effet significatif que sur les transferts thermiques dans le mur. Une variation de la conductivité thermique implique la variation de nombre de Biot thermique, qui caractérise les transferts thermiques à l'intérieur et à la surface de la structure porteuse. Pour une faible conductivité thermique et une capacité thermique plus importante, le matériau est plus isolant, d'une plus grande inertie thermique, visible grâce à la plus faible variation de la température transversale. De plus, les échanges thermiques surfaciques sont moins importants, caractérisés par une température de surface extérieure plus élevée. En revanche, comme attendu, les températures à mi-épaisseur de la paroi sont relativement constantes.

Les distributions longitudinale et transversale de la température en fonction de la variation de la conductivité montrent que la conductivité thermique augmente en fonction du gradient thermique entre

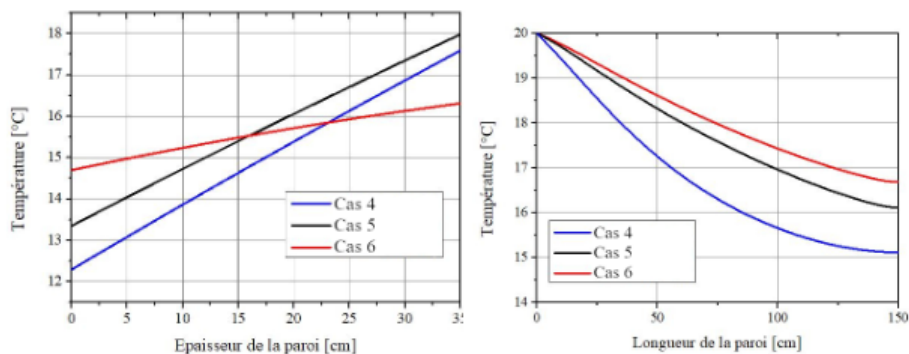


FIGURE 4. Évolutions de la température au sein du mur humide au regard de la conductivité thermique

la surface externe et la surface interne de la paroi. En effet, l'augmentation de la conductivité thermique de la structure porteuse implique la diminution du nombre de Biot thermique. Par conséquent, le nombre de Biot thermique est inverse à la résistance thermique de convection, responsable du gradient de température entre les deux surfaces de la paroi.

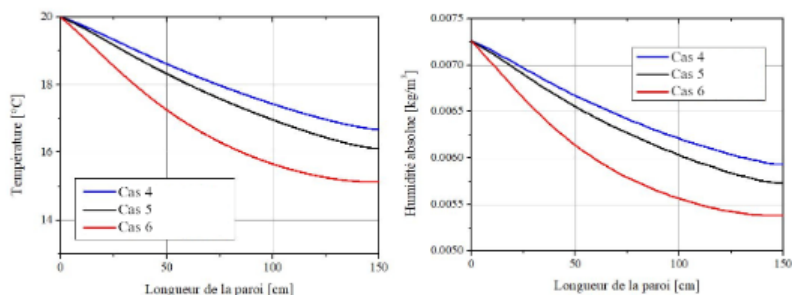


FIGURE 5. Évolutions de la température et de l'humidité relative au sein de la lame d'air au regard de la conductivité thermique

La figure 5 présente les évolutions de la température et l'humidité absolue de l'air au sein de la lame ventilée en fonction de la variation de la conductivité thermique et la capacité thermique de la paroi. On constate que la température ainsi que l'humidité absolue de l'air dans le canal diminuent progressivement en allant de l'amont vers l'aval du canal. Cette diminution est moins importante lorsque la conductivité thermique de la structure porteuse est peu élevée. En effet, plus la conductivité thermique d'un matériau est faible plus la température de l'air qui s'écoule à son voisinage entre l'amont et l'aval de la lame d'air est importante. Par conséquent, l'augmentation de la température de l'air dans le canal ventilé engendre une augmentation de la pression de vapeur d'eau saturante, permettant par la suite à l'air de contenir une concentration de vapeur d'eau plus importante. On peut en conclure que l'augmentation de la conductivité thermique du milieu poreux réduit les transferts de masse par convection mais n'a aucun effet sur le transfert diffusif de la matière. Ceci justifie l'augmentation de l'humidité absolue dans la lame d'air. Néanmoins l'augmentation de la conductivité thermique engendre une variation de température de l'air de 0.57°C , soit un écart relatif de 3.5%, similaire pour concentration de vapeur d'eau dans la lame d'air. La diminution de la conductivité thermique engendre une variation de température de l'air de 1°C , soit un écart relatif de 7%. Le même écart relatif est observable pour la concentration de vapeur d'eau de l'air.

La figure 6 reporte la sensibilité des transferts hygrothermiques aux propriétés thermiques de la paroi. Les nombres de Nusselt et Sherwood locaux sont investis. L'évolution du nombre de Nusselt local au regard de la conductivité thermique montre que les valeurs les plus élevées de Nusselt local correspondent à des faibles valeurs de conductivité thermique. En effet le nombre de Nusselt local est inversement proportionnel à la conductivité thermique. L'augmentation de la conductivité thermique favorise les échanges thermiques par conduction et, par la suite, réduit les échanges convectifs entre la paroi humide et le canal ventilé. En revanche, pour des faibles valeurs de conductivité thermique, le nombre de Nusselt local atteint des valeurs plus importantes, de l'ordre de 180. L'évolution du nombre de Sherwood en fonction de la performance thermique de la paroi montre que la variation de ce paramètre n'a qu'un

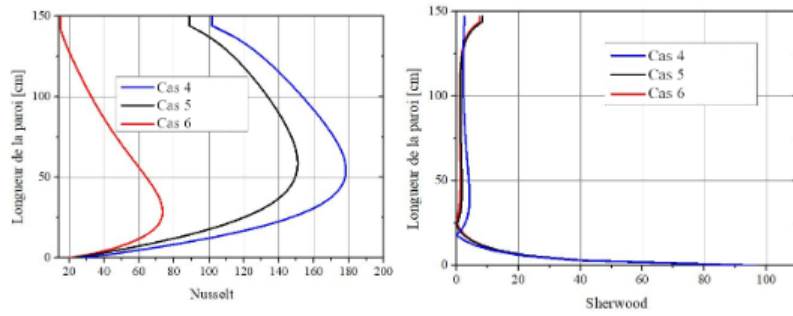


FIGURE 6. Évolutions des nombres de Nusselt et Sherwood locaux à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux au regard de la conductivité thermique

effet faiblement marqué sur les échanges massiques. Néanmoins, pour des performances thermiques assez importantes, de faibles valeurs du nombre de Sherwood sont obtenues. Une conductivité thermique assez élevée stimule les transferts par diffusion par agitation thermique.

Une variation de $\pm 10\%$ de la valeur de la conductivité thermique, représentative d'une incertitude expérimentale admissible en laboratoire, a un impact sensible sur la modélisation du comportement de la paroi. Les résultats précédents montrent que la conductivité thermique a une influence non négligeable sur les profils de température au sein de la structure porteuse et de température de l'air dans le canal. L'analyse des nombres de Nusselt et de Sherwood locaux montre également qu'une variation de 10% de la conductivité thermique engendre un écart type relative pouvant atteindre 50% des résultats numériques, notamment sur les échanges thermiques.

2.3 IMPACT DES PROPRIÉTÉS HYGRIQUES DE L'OSSATURE

L'identification des performances hygriques de matériaux de construction montre une incertitude non négligeable dans les résultats des essais en laboratoire, sans même tenir compte des différences fortes de caractéristiques entre les multiples échantillons d'un même matériau prélevés au sein d'une même paroi. Ainsi, dans le but d'étudier l'impact de la variation des propriétés hygriques sur le comportement hygrothermique global de la paroi, une étude de sensibilité à la variation du coefficient de diffusion hygrique est menée. Trois cas de simulation sont considérés (cas 5, 7 et 8) qui correspondent respectivement à un coefficient de diffusion hygrique de $1.5E-8$, $1.2E-8$ et $2E-8$. L'effet de la sensibilité face au coefficient de diffusion hygrique s'explique par le degré de sensibilité sur l'état hygrothermique du matériau car ce coefficient traduit l'importance des phénomènes de diffusion de la vapeur d'eau au sein du matériau, de son transfert thermique par conduction et de son pouvoir tampon hygroscopique. La figure 7 présente

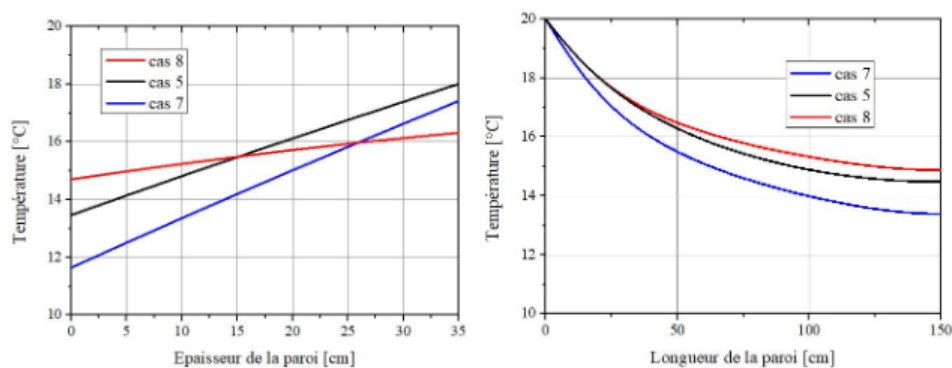


FIGURE 7. Évolutions de la température au sein du mur humide en fonction de la diffusion hygrique

l'influence de la variation des propriétés hygriques de la structure porteuse sur les profils longitudinaux et transversaux de la température au centre de la paroi. Une variation de la diffusivité hygrique du matériau de construction composant le mur humide implique la variation du nombre de Biot massique. Pour une valeur de diffusivité massique importante (cas 8), le matériau est perméable, caractéristique visible en figure 6 grâce à la plus faible variation des températures transversale et longitudinale du mur. En effet, l'air chaud circulant dans la lame d'air a une plus grande capacité à contenir de la vapeur d'eau.

Dans ces simulations, l'ambiance extérieure est maintenue dans des conditions constantes, à 10°C et 70% d'humidité relative, ce qui représente des conditions climatiques hivernales. Ces conditions impliquent que la pression de vapeur résultante est souvent supérieure à l'intérieur du local par rapport à l'extérieur. Ce différentiel de pression de vapeur engendre une migration de vapeur par diffusion vers l'extérieur. Cette vapeur traverse le mur humide et se rapproche de l'extérieur, puis se refroidit progressivement. Si la température du point de rosée est atteinte, la vapeur se condense à l'intérieur du matériau et peut alors dégrader les performances des matériaux et avoir des conséquences sur la durabilité et la pérennité de la paroi, sur ses performances ainsi que sur le confort et la santé des occupants. L'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau, gouvernée par le coefficient de diffusion hygrique, a pour conséquence de réduire le risque de condensation interne au travers de l'augmentation de la température au sein de la paroi. La pression de vapeur d'eau reste continuellement inférieure à la pression de vapeur d'eau saturante car la température de surface interne de la paroi reste suffisamment élevée. D'une manière similaire, une diminution de la diffusion hygrique engendre une augmentation de la résistance à la diffusion de vapeur (cas 7). Le matériau est moins perméable, ce qui a pour conséquence de condenser l'humidité à l'intérieur du matériau, et par la suite de refroidir la paroi.

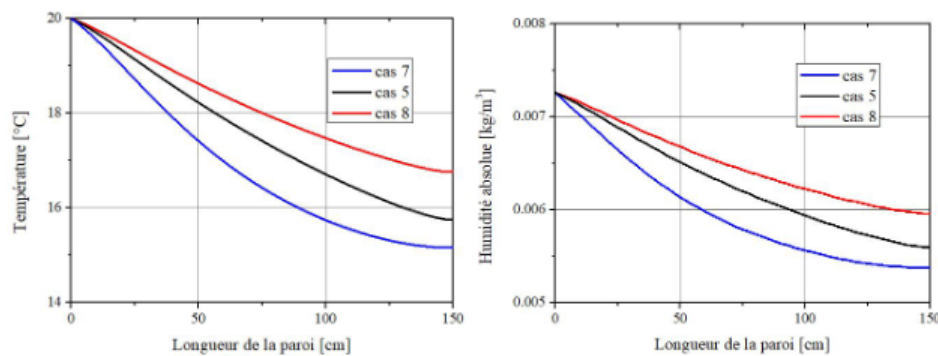


FIGURE 8. Évolutions de la température et de l'humidité absolue de l'air dans la lame d'air en fonction de la diffusion hygrique

La figure 8 montre l'évolution de la température et de l'humidité absolue de l'air circulant dans la lame ventilée adossée au mur humide. Ces résultats montrent que la résistance du matériau à la diffusion de vapeur d'eau, gouvernée par la diffusivité hygrique, stimule les transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. L'air se refroidit et sa capacité à contenir de la vapeur d'eau est réduite. Une augmentation de la diffusion hygrique du mur de $\pm 30\%$ implique un écart type relatif de $\pm 7\%$ des résultats numériques, tant pour la température que pour l'humidité absolue de l'air (par rapport à la valeur de référence du cas 5). Une diminution de la diffusion hygrique du mur de $\pm 20\%$ engendre une variabilité des résultats de l'ordre de $\pm 3\%$ en température et en humidité absolue de l'air.

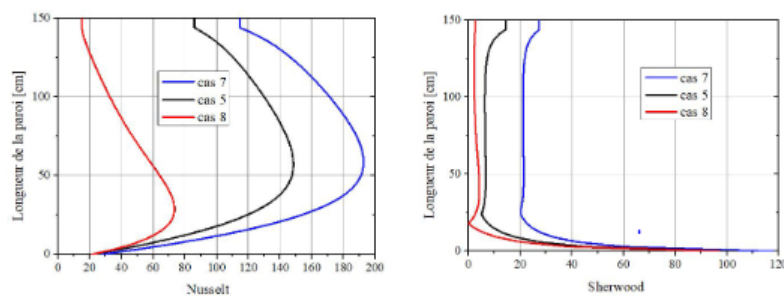


FIGURE 9. Évolutions de nombre de Nusselt et Sherwood en fonction de la diffusion hygrique

L'influence du coefficient de diffusion hygrique sur les nombres adimensionnés de Nusselt et de Sherwood locaux est présentée en figure 9, à l'interface entre la lame d'air et le milieu poreux. Les transferts hydrothermiques sont sensiblement influencés par la variation de la diffusivité hygrique du milieu poreux. L'évolution du nombre de Nusselt local montre que les valeurs les plus élevées de Nusselt local le long de l'interface correspondent à une faible valeur de diffusivité hygrique. En effet, la diminution du coefficient de diffusion hygrique du milieu poreux augmente le gradient thermique, stimulant alors les transferts

thermiques par convection. Il en résulte une augmentation significative du nombre de Nusselt. Le nombre de Sherwood est inversement proportionnel au coefficient de diffusion de vapeur d'eau. Un coefficient de diffusion hygrique élevée engendre alors une forte prédominance des transferts de masse par diffusion, par rapport à la convection (le nombre de Sherwood décroît). Finalement, une variation moyenne de $\pm 25\%$ de la valeur du coefficient de la diffusion hygrique a un impact sensiblement important sur la modélisation du comportement hygrothermique de la paroi. Les résultats précédents montrent que ce coefficient de diffusion hygrique a une très forte incidence sur la température du mur humide et de l'air dans la lame ventilée. L'analyse des nombres de Nusselt et Sherwood locaux, dans le même sens, montre qu'une variation moyenne de $\pm 25\%$ de la valeur de la diffusivité hygrique, engendre un écart type relative respectivement de 50% et 6% pour les échanges thermique et massique.

3 CONCLUSION

Au travers de cette étude de sensibilité du modèle aux propriétés des matériaux en présence. Ce papier s'est concentrée sur la porosité de la brique, ses performances thermiques, puis hygriques et enfin. Tous ces paramètres ont une influence sur la réponse hygrothermique et sur l'équilibre de la paroi humide ventilée. Néanmoins, ces impacts ne sont pas équivalents. En effet, la porosité, caractéristique physique délicate à déterminer expérimentalement, a une influence significative sur les phénomènes des transferts hygrothermiques. La conductivité thermique influence également sensiblement les transferts thermiques. Néanmoins, la nature des échanges reste identique (nombres de Nusselt et de Sherwood). Les mêmes observations sont valables pour une variation du coefficient de diffusion hygrique. Par conséquent, une bonne maîtrise des techniques de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques et physiques des matériaux de construction s'avère nécessaire pour assurer une bonne prédiction des transferts hygrothermiques dans les enveloppes ventilées de bâtiments humides.

RÉFÉRENCES

- ADEME (2020). Amélioration énergétique des bâtiments existants. [https://www.ffbatiment.fr/\[13/02/2020\]](https://www.ffbatiment.fr/[13/02/2020]).
- Berger, J. (2014). *Contribution to the hygrothermal modeling of buildings : application of model reduction methods*. Phd thesis, Université Grenoble Alpes.
- Claude, S. (2018). experimental and numerical study of solutions based on eco-materials for the thermal renovation of urban buildings.
- 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.
- Promis, G. (2021). An innovative system for the treatment of rising dampness in buildings located in cold climates. *Energies*, 14 :3421.
- Torres, M. I. M. et de Freitas, V. P. (2007). Treatment of rising damp in historical buildings : wall base ventilation. *Building and environment*, 42(1) :424–435.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paaajanen, L., et Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3) :201–224.