

Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois à l'échelle urbaine : Étude et application au centre-ville médiéval de Cahors

Margot Ruiz

LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France et CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

RESUME Les centres-villes historiques se composent de bâtiments construits à partir de matériaux fortement perméables à l'eau liquide et à la vapeur d'eau. Il est donc primordial de considérer les transferts hydriques à travers les parois pour décrire le comportement hygrothermique du bâti ancien. Ce phénomène est cependant négligé par les modèles de climat urbain, alors qu'il peut avoir une importance capitale dans l'étude du refroidissement des parois et du confort extérieur. Cette thèse propose une nouvelle méthode de résolution numérique des transferts couplés de masse et de chaleur, spécialement adaptée à la simulation à l'échelle urbaine. Cette méthode a été validée numériquement par comparaison avec un modèle de référence Delphin, sur plusieurs cas d'étude. Sa fiabilité pour représenter les parois anciennes a été évaluée par comparaison des résultats simulés et des données mesurées dans des bâtiments anciens du centre-ville de Cahors (France). Un modèle de transferts couplés résolu avec cette méthode a été intégré dans le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance), ce qui permet la simulation du comportement hygrothermique des parois anciennes et l'évaluation de leur impact énergétique à l'échelle du bâtiment et microclimatique à l'échelle de la ville.

Mots-clés Transferts hygrothermiques, centre-ville historique, méthode de résolution, mesures in-situ, rénovation

I. INTRODUCTION

Les parois anciennes sont composées de matériaux particulièrement sensibles aux transferts d'humidité. Ainsi, l'ajout d'un isolant inadapté peut perturber l'équilibre hydrique de ces parois. Face à cette problématique, l'isolation à partir de matériaux biosourcés est une option pertinente, puisque ces matériaux fortement hygroscopiques permettent de conserver une partie de la perméabilité de la paroi. Plusieurs études ont montré que dans certaines configurations, ces matériaux hygroscopiques améliorent le confort intérieur et extérieur du fait de leur capacité de tampon hydrique et de leur potentiel de rafraîchissement par évaporation et peuvent ainsi entraîner une diminution des consommations énergétiques (Maalouf et al., 2014; Saneinejad et al., 2014).

Pour simuler correctement les bâtiments anciens et leur rénovation à partir de matériaux biosourcés, il est important de considérer les spécificités des parois anciennes et en particulier leur comportement hydrique (Webb, 2017). L'échange d'humidité à travers les parois est un phénomène

souvent considéré à l'échelle du bâtiment mais généralement négligé à l'échelle urbaine. Notre étude utilise le modèle TEB (Town Energy Balance) conçu pour paramétrer les échanges énergétiques, radiatifs, hydriques et turbulents entre les surfaces bâties et l'atmosphère. Il permet également de simuler l'évolution dynamique des conditions intérieures et des consommations énergétiques des bâtiments ainsi que d'évaluer le microclimat dans la rue (Bueno et al., 2012). L'objectif de mon travail est d'intégrer les transferts d'humidité dans la paroi au modèle TEB.

De nombreux outils permettent de simuler les transferts couplés, Delgado et al. (2012) en proposent une revue. Ces outils se différencient par les hypothèses simplificatrices, les équations du modèle, les méthodes de discrétisation ou encore les méthodes de résolution numérique utilisées. Dans la littérature, plusieurs méthodes de résolution efficaces existent, par exemple les méthodes de réduction de modèle, qui ne sont pas adaptées à l'outil TEB. Il en est de même pour les schémas implicites associés à des méthodes de résolution itératives, ainsi que pour les schémas explicites.

Cet article propose une méthode numérique à la fois adaptée à un outil à l'échelle urbaine et efficace pour résoudre les transferts hygrothermiques. Cette méthode de résolution est validée numériquement et expérimentalement. Ensuite, les transferts hydriques à travers les parois sont intégrés dans le modèle urbain TEB, en appliquant la méthode développée. L'impact de l'ajout de ce phénomène physique sur les résultats simulés est discuté.

II. MODÈLE ET MÉTHODE NUMÉRIQUE

A. Modèle de transferts couplés de masse et de chaleur

Le modèle 1D utilisé pour décrire les transferts hygrothermiques, s'appuie sur les travaux de Nicolai (2007). Il se compose de deux équations (1) et (2), correspondant respectivement aux bilans de conservation de l'énergie et de la masse. Les membres de gauche sont des termes de stockage et à droite ce sont les termes de transport. Les types de transfert considérés sont : les transferts de chaleur par conduction, les transferts d'eau sous forme vapeur avec la diffusion de Fick et les transferts d'eau sous forme liquide en utilisant la loi de Darcy. Les deux équations suivantes sont écrites en fonction de deux inconnues, qui sont la température et la pression capillaire. La pression capillaire a été choisie comme potentiel pour l'humidité, car sa valeur est continue à l'interface entre deux couches de matériaux et elle permet d'obtenir des résultats satisfaisants (Nicolai 2007).

$$(c_{mat} \rho_{mat} + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\lambda + h_v K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \left[L_v K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \varphi + \frac{p_c \rho_v}{T \rho_l} \right] \frac{\partial T}{\partial x} + \left[K_l + K_v \frac{\rho_v}{\rho_l} \right] \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Avec c_{mat} la capacité thermique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), ρ_{mat} la masse volumique du matériau sec ($kg.m^{-3}$), c_l la capacité thermique de l'eau liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), w la teneur en eau ($kg.m^{-3}$), λ la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$), T la température (K), L_v la chaleur latente de vaporisation (J/kg), K_v la perméabilité à la vapeur du matériau ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$), $p_{v,sat}$ la pression de vapeur à saturation (Pa), φ l'humidité relative (-), p_c la pression capillaire (Pa), ρ_v la masse volumique de la vapeur d'eau ($kg.m^{-3}$), ρ_l la masse volumique de l'eau liquide ($kg.m^{-3}$) et K_l le coefficient de conductivité de l'eau liquide (s).

Le modèle présenté décrit les transferts couplés de masse et de chaleur dans une paroi multicouche en 1D, ce qui ne permet pas de modéliser les phénomènes ponctuels comme les ponts thermiques. La direction simulée est la direction perpendiculaire à la paroi, qui est supposée plane. La conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur ainsi que le coefficient de conductivité de l'eau liquide sont des propriétés qui évoluent en fonction de la teneur en eau du matériau. Le modèle effectue des hypothèses courantes en négligeant les phénomènes suivants : l'effet d'hystérésis, l'effet de la gravité, la formation de glace, les transferts d'air à travers les parois, les réactions chimiques, l'effet Soret, les processus d'altération des pores, la dépendance du stockage d'humidité à la température et la contribution des phases gazeuses au stockage de chaleur. Les spécificités de ce modèle sont de négliger la dépendance du stockage de chaleur à la variation temporelle de la pression capillaire et l'effet des transferts d'eau liquide sur l'équation de la chaleur. Les interfaces entre les couches sont gérées par continuité des flux et aucune résistance de contact n'est considérée. Concernant les conditions aux limites, la surface extérieure de la paroi est soumise à la variation des conditions météorologiques comme la température, l'humidité relative, la pluie, le rayonnement solaire et les rayonnements à grande longueur d'onde émis par les particules présentes dans l'atmosphère (aérosols, etc.) et les autres surfaces du milieu urbain. Pour la pluie et le rayonnement solaire, un flux est directement imposé, ce qui correspond à une condition aux limites de type Neumann. Les autres conditions aux limites correspondent à des conditions de Fourier (mixtes), puisqu'elles s'appuient sur un coefficient d'échange associé à la différence entre une grandeur au niveau de la surface et sa valeur dans l'environnement local.

$$q_{CL} = h_{conv,th} (T_{ext} - T_{sext}) + \alpha q_{SW,inc} + \varepsilon \sigma (T_{equiv}^4 - T_{sext}^4) + L_v h_{conv,m} \left[p_{v,ext} - p_{v,sat}(T_{sext}) \exp\left(\frac{p_{c,sext}}{\rho_l R_v T_{sext}}\right) \right] + c_l (T_{ext} - T_{ref}) j_{pluie} \quad (3)$$

$$j_{CL} = h_{conv,m} \left[p_{v,ext} - p_{v,sat}(T_{sext}) \exp\left(\frac{p_{c,sext}}{\rho_l R_v T_{sext}}\right) \right] + j_{pluie} \quad (4)$$

Avec $h_{conv,th}$ le coefficient de convection thermique ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), $h_{conv,m}$ le coefficient de convection massique ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$), α le coefficient d'absorption solaire, $q_{SW,inc}$ le flux solaire radiatif incident à la façade ($W \cdot m^{-2}$), ε l'émissivité de la façade et j_{pluie} le flux de pluie battante incident à la façade ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).

Côté intérieur, les conditions aux limites pour les équations de la chaleur et de la masse se restreignent aux échanges convectifs thermiques et massiques. Dans cette partie, les échanges radiatifs à grandes longueurs d'onde sont négligés à l'intérieur du bâtiment.

B. Méthode de résolution numérique

L'objectif de cette section est de développer une méthode numérique appropriée pour résoudre les équations de transferts couplés dans un modèle de climat urbain. La méthode de résolution numérique proposée doit être facilement intégrable dans TEB et fonctionner à des échelles spatio-temporelles larges. Des compromis entre précision et temps de calcul doivent être trouvés, tout en sachant que les simulations à l'échelle de la ville sont basées sur des hypothèses simplificatrices.

La méthode de résolution développée possède les caractéristiques suivantes Ruiz et al. (2023) :

- La méthode des différences finies est utilisée en appliquant un schéma implicite/explicite (IMEX), car il ne nécessite pas l'emploi d'une méthode de résolution itérative et complexe pour être stable numériquement.
- La discrétisation temporelle se fait par des différences finies décentrées à droite de premier ordre et la discrétisation spatiale consiste à approximer par une différence centrée de second ordre.
- Le pas de temps est fixé à cinq minutes et réduit à dix secondes dans les moments critiques pour la stabilité numérique, qui sont identifiés par cinq tests (qui vérifient la quantité de pluie absorbée, les valeurs de la pression capillaire, les oscillations et les variations brusques entre les pas de temps).
- Les équations de la chaleur et de la masse sont résolues au travers d'une approche numérique découplée, qui consiste à résoudre deux systèmes matriciels séparés un pour l'humidité l'autre pour la chaleur à chaque pas de temps (Figure 1).
- La résolution des systèmes est effectuée en appliquant la méthode de décomposition LU

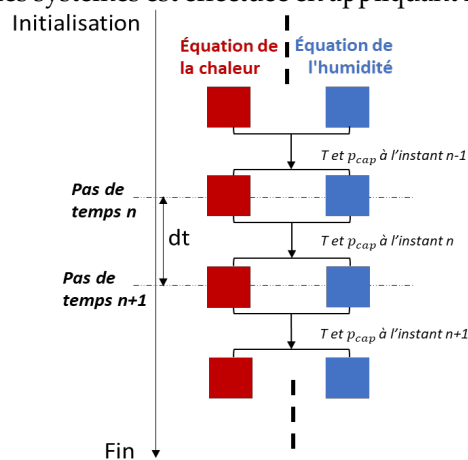


FIGURE 1. Approche de résolution numérique découplée

C. Validation numérique

Cette méthode de résolution a été numériquement validée par comparaison des résultats avec ceux d'un outil de référence (Delphin), qui permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur en appliquant une fine résolution. L'évaluation de cette nouvelle méthode se concentre sur la vérification des données utilisées pour le calcul des échanges avec l'ambiance intérieure et l'environnement urbain extérieur, ainsi que sur la cohérence globale des données simulées à l'intérieur de la paroi. Cette étude est effectuée sur quinze configurations de paroi et trois climats. Les critères de validation sont adaptés aux attentes à l'échelle urbaine. Ruiz et al. (2023) présente en détail les cas de validation étudiés ainsi que les résultats obtenus.

Une analyse de sensibilité au maillage a été effectuée et a montré que les parois peu perméables nécessitent un maillage plus fin que celles constituées de matériaux fortement hygroscopiques ou capillairement actifs. Par ailleurs, plus la paroi est constituée de matériaux différents, plus le maillage doit être fin. Finalement, la version du maillage qui fournit des résultats satisfaisants pour tous les cas d'étude a les caractéristiques suivantes : une dimension de 1 mm pour la première maille, un facteur d'étirement de 1,5 et une taille maximum de maillage de 10 cm, sans affinement du maillage aux interfaces entre les couches de matériaux. Ainsi, une maille peut être composée de

plusieurs matériaux. Dans ce cas, les propriétés hygrothermiques de la maille sont calculées en effectuant une moyenne pondérée des propriétés des différents matériaux présents dans la maille.

D. Validation expérimentale

Cette section vise à vérifier la fiabilité de la méthode développée pour représenter les parois d'un centre-ville médiéval. Un living-lab localisé à Cahors (Claude, 2018) permet de mesurer l'évolution de la température et de l'humidité dans trois parois de compositions différentes. L'exemple présenté dans ce travail est une paroi ancienne en brique rénovée à partir d'une isolation en chaux-chanvre (Figure 2). Ces matériaux ont été caractérisés en laboratoire (Claude, 2018). Les conditions aux limites sont fournies par une station météorologique localisée sur un toit dans le même quartier et par des capteurs mesurant les conditions à l'intérieur des bâtiments étudiés.

Les résultats des simulations effectuées en utilisant la nouvelle méthode sont comparés aux données mesurées, sur une période de neuf mois (du 15 avril 2021 au 17 janvier 2022). La comparaison est réalisée en trois points de la paroi : à l'interface (température et humidité relative), au milieu de l'isolant (température et humidité relative) et au niveau de la surface intérieure (température). Pour évaluer les résultats obtenus, la méthodologie développée par Huerto-Cardenas et al. (2020) est appliquée aux conditions hygrothermiques dans les parois anciennes. Ainsi, les deux critères utilisés pour la validation sont l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de Pearson, qui quantifier la corrélation linéaire entre deux ensembles de données. Pour le MAE, il y a deux niveaux de validation, les valeurs seuils sont 1°C et 5%HR pour le premier niveau, 2°C et 10%HR pour le second niveau. La valeur seuil pour le coefficient de Pearson est fixée à 0,7, pour les deux niveaux.

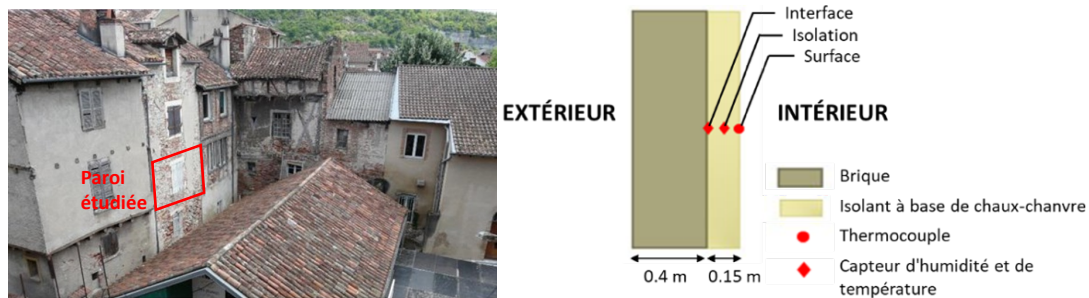


FIGURE 2. Configuration de la paroi étudiée

Les résultats obtenus pour la paroi étudiée sont présentés dans le Tableau 1. Les cinq variables respectent les critères de validation établis pour le premier niveau de validation. Un travail similaire a été effectué sur deux autres parois ayant une structure à pan de bois remplie de brique et rénovée avec deux méthodes différentes : une avec du polystyrène et l'autre avec du chaux-chanvre. Des résultats satisfaisants ont également été obtenus, ce qui permet de conclure que la méthode numérique développée est adaptée pour la simulation hygrothermique des centres historiques.

TABLEAU 1. Coefficient de Pearson et MAE entre les données mesurées et simulées

| Variable | Tinterface | Tisolation | Tsurface | HRinterface | HRisolation |
|------------------------|------------|------------|----------|-------------|-------------|
| MAE | 0,916 °C | 0,816 °C | 0,318 °C | 3,100 % | 2,867 % |
| Coefficient de Pearson | 0,992 | 0,994 | 0,997 | 0,852 | 0,767 |

III. SIMULATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES A L'ECHELLE URBAINE

A. Intégration dans le modèle TEB

Le modèle TEB a été conçu pour paramétrer les échanges énergétiques, radiatifs, hydriques et turbulents entre les surfaces bâties et l'atmosphère. Une rue moyenne de longueur infinie représente un quartier (tous les bâtiments ne peuvent pas être simulés individuellement au vu des échelles spatiales). Ce modèle intègre le module BEM (Building Energy Model) (Bueno et al., 2012), qui permet de simuler le comportement énergétique des bâtiments (Figure 3). Ainsi, TEB évalue la demande énergétique et quantifie les interactions entre le microclimat du canyon et les bâtiments. Le modèle TEB effectue un bilan thermique et un bilan massique pour calculer la température et l'humidité spécifique de l'air intérieur en tenant compte des gains internes, des échanges dus à l'ouverture des fenêtres, aux infiltrations d'air ou aux équipements de CVC (Chauffage Ventilation Climatisation). De manière similaire, la température et l'humidité de l'air dans le canyon urbain sont calculés en considérant les émissions anthropiques, les échanges avec l'atmosphère, la végétation, la route et le sol. Cependant, la version actuelle de TEB néglige les transferts d'humidité à travers les murs et ne considère que les transferts de chaleur par conduction.

Ce travail de thèse a permis de développer une nouvelle version de TEB intégrant les transferts hydriques à travers les parois (Figure 3). Pour cela, la méthode précédemment développée et validée a été intégrée dans TEB. Ainsi, le modèle TEB peut désormais simuler le potentiel de refroidissement par évaporation à la surface des parois, la capacité de tampon hydrique des matériaux, ainsi que l'effet de l'eau contenue dans les pores sur la conduction thermique des parois.

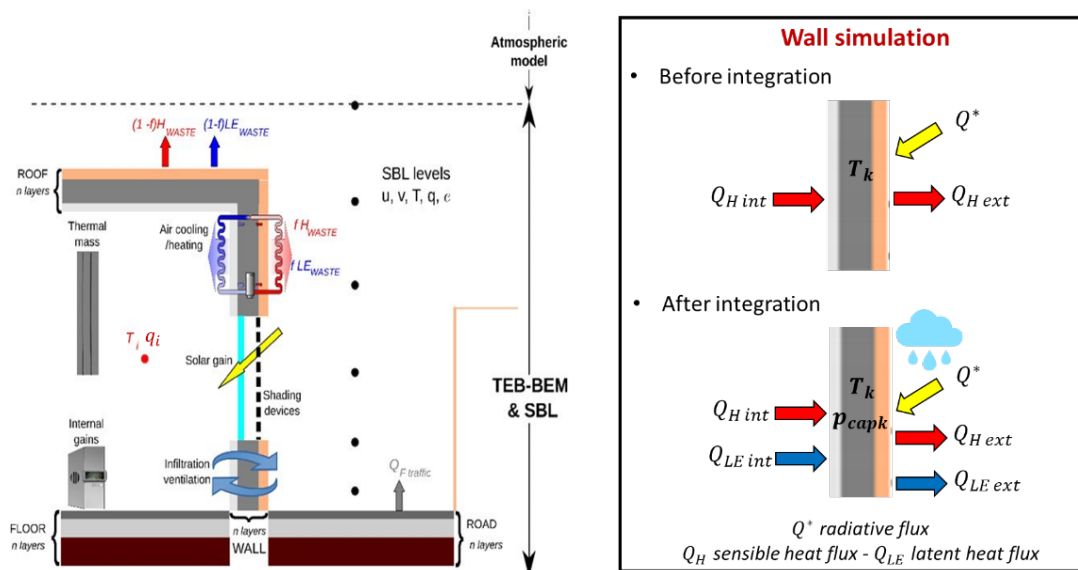


FIGURE 3. Description de BEM (à gauche) (Bueno et al., 2012) et des modifications apportées (à droite)

B. Cas simulé

Un cas d'étude représentatif du centre médiéval de Cahors est simulé avec TEB. Les conditions météorologiques imposées sont celles enregistrées à l'aérodrome de Cahors en 2016. La configuration du canyon urbain simulée est décrite dans la Figure 4. Ce canyon urbain moyen se compose d'une rue étroite et de parois de briques anciennes rénovées à partir de chaux-chanvre.

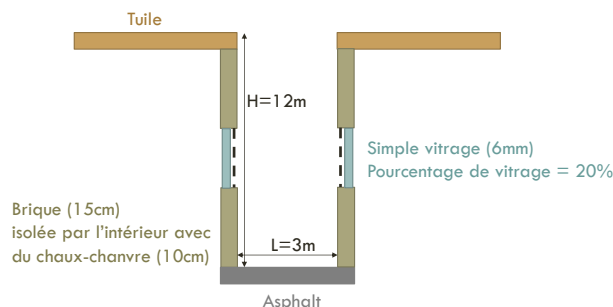


FIGURE 4. Schéma du canyon urbain moyen simulé

Concernant les équipements de CVC, un système de chauffage par l'air est utilisé et la consigne de température varie en fonction des scénarios d'occupation. Aucun système de climatisation, ni de ventilation mécanique n'est installé. Seule une infiltration d'air de 7 vol/h à 50 Pa est imposée.

C. Comparaison des résultats avant et après intégration

Les transferts hydriques à travers les parois ont été intégrés dans TEB, pour quantifier leur impact à l'échelle urbaine. Cette partie compare donc les résultats avant et après intégration, sur le centre de Cahors comportant des parois très perméables à l'eau sous forme liquide et vapeur. La version modifiée donne une température intérieure légèrement plus faible de l'ordre de 0,2°C (Figure 5). Une différence plus nette est observée pour l'humidité relative intérieure. En effet, la capacité de tampon hydrique du chaux-chanvre permet de réguler les fluctuations de l'humidité intérieure.

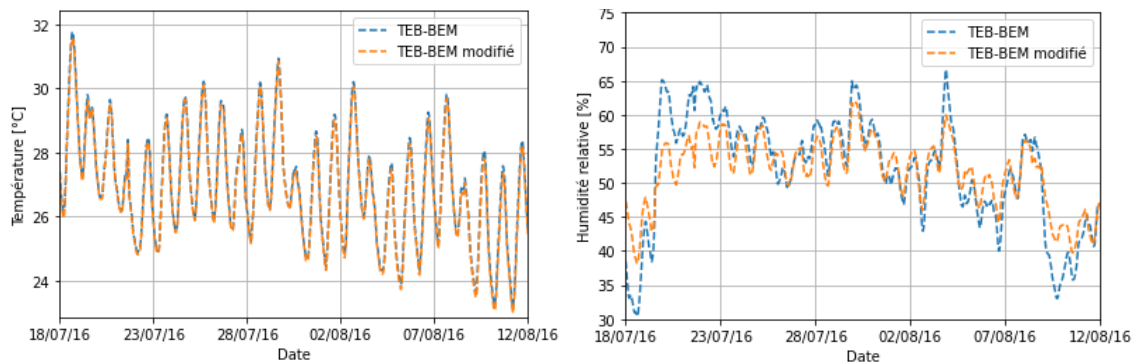


FIGURE 5. Comparaison de la température (à gauche) et de l'humidité relative (à droite) à l'intérieur du bâtiment avant et après intégration des transferts hydriques

Par ailleurs, les consommations énergétiques liées au chauffage sont jusqu'à 5% plus élevées, lorsque les transferts hydriques sont considérés, car les matériaux humides ont une conductivité thermique plus élevée que les matériaux secs. Le confort des personnes a également été évalué en utilisant l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), un indice de confort, qui prend en compte les principales variables climatiques et un modèle physiologique. La comparaison a montré une diminution de l'UTCI allant jusqu'à 0,5°C à l'extérieur et jusqu'à 1°C à l'intérieur en été, lorsque les transferts hydriques sont pris en compte. Ainsi, une légère amélioration du confort est observée.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une nouvelle méthode numérique a été développée. Elle est basée sur des caractéristiques originales, qui la rendent facilement intégrable dans un modèle à l'échelle urbaine tout en assurant

la stabilité numérique et un niveau de précision très satisfaisant. La méthode a été validée par comparaison des résultats avec ceux de l'outil de référence Delphin. De plus, la confrontation des résultats simulés à des mesures in-situ a montré la fiabilité de la méthode pour représenter le cas complexe du centre médiéval de Cahors. La méthode développée a permis d'intégrer les transferts hygrothermiques dans le modèle TEB de MétéoFrance. TEB devient ainsi le premier modèle permettant de simuler simultanément les transferts hydriques à travers les parois et les interactions entre les bâtiments et le climat urbain, sur de longues échelles spatio-temporelles. Un cas représentant le centre médiéval de Cahors a été simulé avec les deux versions de TEB (avant et après intégration des transferts hydriques.) La comparaison a mis en avant un impact significatif de ce phénomène à plusieurs niveaux : sur les conditions hygrothermiques à l'intérieur du bâtiment, les consommations énergétiques et le confort thermique à l'intérieur et à l'extérieur.

La prochaine étape de ma thèse sera d'utiliser la version améliorée de TEB pour évaluer plusieurs scénarios de rénovation du centre-ville médiéval de Cahors, en fonction des consommations énergétiques, de la durabilité des parois, de la conservation du patrimoine, du confort d'été à l'intérieur et dans le canyon urbain. Des recommandations seront ensuite formulées à destination des acteurs locaux de la rénovation. De manière plus générale, l'amélioration du modèle TEB va permettre de compléter la littérature sur l'impact des échanges d'humidité à travers les parois.

REFERENCES

Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L.K., Zibouche, K., Marchadier, C., 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geosci. Model Dev.* 5, 433–448. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-433-2012>

Claude, S., 2018. Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain (PhD Thesis). INSA de Toulouse.

Delgado, J.M.P.Q., Barreira, E., Ramos, N.M.M., Freitas, V.P. de, 2012. *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*. Springer Science & Business Media.

Huerto-Cardenas, H.E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V., Lucchi, E., 2020. Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Build. Environ.* 180, 107081. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>

Maalouf, C., Le, A.D.T., Umurigirwa, S.B., Lachi, M., Douzane, O., 2014. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy Build.* 77, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>

Nicolai, A., 2007. Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials. *Mech. Aerosp. Eng. Theses Diss.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2016.2088>

Ruiz, M., Masson, V., Bonhomme, M., Ginestet, S., 2023. Numerical method for solving coupled heat and mass transfer through walls for future integration into an urban climate model. *Build. Environ.* 231, 110028. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110028>

Saneinejad, S., Moonen, P., Carmeliet, J., 2014. Coupled CFD, radiation and porous media model for evaluating the micro-climate in an urban environment. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 128, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.02.005>

Webb, A.L., 2017. Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77, 748–759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>