Intégration du comportement hygrothermique des parois dans un modèle de climat urbain : proposition d'adaptation du schéma de résolution numérique des transferts couplés de chaleur et d'humidité

Margot Ruiz*[1,2], Marion Bonhomme[1], Valéry Masson[2], Stéphane Ginestet[1]

[1] LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Toulouse, France
[2] CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France
***mruiz@insa-toulouse.fr**

RESUME.

Face à l'urgence climatique et au phénomène d'îlot de chaleur urbain, il devient urgent de réhabiliter les centres historiques composés de bâtiments peu isolés. Un des leviers d'action envisagé est l'isolation des bâtiments à partir de matériaux biosourcés. Les modèles à l'échelle urbaine comme TEB (Town Energy Balance) permettent d'évaluer la pertinence de cette solution pour réduire les consommations énergétiques, favoriser le confort intérieur des habitants et limiter l'îlot de chaleur urbain. Néanmoins, ces modèles ne considèrent généralement pas les transferts d'humidité à travers les parois, qui sont pourtant une des caractéristiques principales des matériaux anciens et biosourcés. Cet article propose une adaptation du schéma de résolution numérique des transferts couplés et une adaptation des échelles de résolution spatio-temporelles, pour les intégrer aux modèles urbains. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un modèle de référence (Delphin), au travers de plusieurs cas d'étude, comprenant des climats extrêmes et des matériaux aux propriétés hygrothermiques variées.

MOTS-CLÉS : Transferts couplés de masse et de chaleur, simulation thermique urbaine, schéma de résolution numérique

ABSTRACT.

Faced with the climate emergency and the urban heat island phenomenon, it is becoming urgent to rehabilitate historic centers composed of poorly insulated buildings. One of the levers considered is the insulation of buildings from bio-sourced materials. Urban scale models such as TEB (Town Energy Balance) make it possible to evaluate the relevance of this solution to reduce energy consumption, promote indoor comfort for inhabitants and limit the urban heat island. Nevertheless, these models do not generally consider the moisture transfer through the walls, which is one of the main characteristics of old and biobased materials. This paper proposes an adaptation of the numerical resolution scheme of coupled transfers and an adaptation of the spatiotemporal resolution scales, to integrate them in urban models. The results obtained have been compared to those of a reference model (Delphin), through several case studies, including extreme climates and materials with various hygrothermal properties.

KEYWORDS : Coupled heat and moisture transfer, urban thermal simulation, numerical resolution scheme

1. INTRODUCTION

Dans ce contexte d'urgence climatique, il devient primordial d'agir pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, plus spécifiquement dans les centres anciens qui se composent généralement de bâtiments peu isolés. De plus, la complexité morphologique des centres historiques les rend particulièrement vulnérables face aux îlots de chaleur urbains (ICU), qui se traduisent par l'observation de températures moyennes plus élevées en ville que dans la campagne environnante. Des projets de recherche ont montré que la rénovation du bâti était un levier d'action majeur pour limiter l'effet d'ICU (Masson et al. 2013). Pour rénover les bâtiments anciens, il convient de comprendre le comportement

de leurs parois, qui sont constituées de matériaux poreux, permettant les échanges d'eau et d'air. 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 la perméabilité de la paroi. Ce type de matériaux a d'autres avantages comme leur potentiel de rafraîchissement par évaporation qui peut être utilisé pour abaisser la température de l'air intérieur ou extérieur, en fonction du positionnement du matériau. De plus, leur capacité à agir comme un tampon hydrique permet de réduire les fluctuations de l'humidité intérieure. Enfin, dans certaines configurations, une diminution conséquente des consommations énergétiques associées au chauffage et au refroidissement peut être observée (Osanyintola et Simonson 2006).

Pour tenir compte des avantages de l'isolation par des matériaux biosourcés à la fois sur le phénomène d'ICU et le confort d'été, il est donc primordial de considérer les performances hydriques. Cependant, peu d'outils à l'échelle urbaine tiennent compte des transferts couplés dans les parois. Cette étude utilise le modèle TEB (Town Energy Balance) (Masson 2000) conçu pour paramétrer les échanges énergétiques, radiatifs, hydriques et turbulents entre les surfaces bâties et l'atmosphère, qui permet aussi de simuler les bâtiments et d'évaluer le microclimat dans la rue. Il comprend notamment un modèle thermique pour représenter les transferts de chaleur par conduction à travers des parois multicouches. Le comportement énergétique des bâtiments est également modélisé pour évaluer les consommations de chauffage et de climatisation. L'objectif de ce 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, de nombreuses méthodes de résolution efficaces existent, par exemple les méthodes de réduction de modèle (Berger et al. 2017). Cependant, ces dernières ne sont pas adaptées pour l'intégration des transferts couplés 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 de discrétisation explicites.

Cet article propose une méthode de résolution à la fois adaptée à un outil à l'échelle urbaine et efficace pour résoudre les transferts couplés. Dans un second temps, ce schéma numérique est évalué, en confrontant les résultats des simulations à ceux d'un outil de référence, pour plusieurs cas d'étude comprenant des climats et des matériaux aux propriétés extrêmes. Le cas de Cahors est approfondi, car cette étude s'inscrit dans le projet global d'évaluer la réhabilitation de son centre historique.

2. MODELE DE TRANSFERTS COUPLES ET METHODE DE RESOLUTION NUMERIQUE

Le schéma numérique proposé doit correspondre à celui de 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.

2.1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

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 verticaux et ponctuels comme les ponts thermiques. De plus, le modèle néglige 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.

2.2. ÉQUATIONS

Le modèle est basé sur celui de l'outil de référence Delphin (Nicolai 2007) et 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.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + h_l K_l \frac{\partial p_c}{\partial x} + h_v K_v \frac{\partial p_v}{\partial x}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho^{v+w}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_l \frac{\partial p_c}{\partial x} + K_v \frac{\partial p_v}{\partial x}\right) \quad (2)$$

$$h_l = c_{T,l}(T - T_{ref}) \quad (3)$$

$$h_v = c_{T,v}(T - T_{ref}) + L_v \quad (4)$$

Avec u la densité d'énergie ($\mathrm{J.m^{-3}}$), ρ^{v+w} la densité de masse de l'eau liquide et vapeur ($\mathrm{kg.m^{-3}}$), λ la conductivité thermique ($\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$), T la température (K), h_l l'enthalpie de l'eau liquide (J), h_v l'enthalpie de la vapeur (J), K_l la conductivité du liquide (s), p_c la pression capillaire (Pa), p_v la pression de vapeur (Pa), K_v la perméabilité à la vapeur du matériau ($\mathrm{kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}}$), c_T la capacité calorifique (J/K) et L_v la chaleur latente de changement de phase ($2500\ \mathrm{J.kg^{-1}}$).

Les équations ainsi écrites comprennent trois potentiels moteurs : la température, la pression de vapeur et la pression capillaire. Or seulement deux équations sont résolues, il faut donc abaisser à deux le nombre de variables inconnues. Le potentiel moteur retenu pour l'humidité est la pression capillaire. Pour exprimer les deux équations précédentes seulement en fonction de la température et de la pression capillaire, la relation de Kelvin est utilisée et les équations suivantes sont obtenues :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\lambda + h_v K_v \left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T}\varphi + \frac{p_c}{T}\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]\right)\frac{\partial T}{\partial x} + h_l\left[K_l + K_v \frac{\rho_v}{\rho_l}\right]\frac{\partial p_c}{\partial x}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho^{v+w}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_v\left[\frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T}\varphi + \frac{p_c}{T}\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]\frac{\partial T}{\partial x} + \left[K_l + K_v\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]\frac{\partial p_c}{\partial x}\right) \quad (6)$$

2.3. CONDITIONS AUX LIMITES

Au niveau de la surface extérieure, la paroi est soumise à la variation des conditions météorologiques comme la température, l'humidité relative, la pluie, les rayonnements solaires et les rayonnements à grande longueur d'onde émis par les particules de l'atmosphère et les autres surfaces du milieu urbain.

$$q_{CL} = q_{conv} + q_{CLO,abs} + q_{GLO,net} + h_v j_{conv} + h_l j_{rain} \quad (7)$$

$$j_{CL} = j_{conv} + j_{rain} \quad (8)$$

Avec q_{conv} le flux de chaleur convectif ($\mathrm{W.m^{-2}}$), j_{conv} le flux de masse convectif ($\mathrm{kg.m^{-2}.s^{-1}}$), $q_{CLO,abs}$ le flux de rayonnement à courte longueur d'onde absorbé par la façade ($\mathrm{W.m^{-2}}$), $q_{GLO,net}$ le flux net de rayonnement à grande longueur d'onde échangé entre la paroi et son environnement ($\mathrm{W.m^{-2}}$) et j_{rain} le flux de pluie battante incident à la façade ($\mathrm{kg.m^{-2}.s^{-1}}$).

La pluie incidente est calculée à partir des données météorologiques, en appliquant le modèle de pluie poussée par le vent de la norme (NF EN ISO 15927-3 2009). Le logiciel EnergyPlus permet de passer des flux radiatifs mesurés sur une surface horizontale aux flux incidents à la paroi.

Côté intérieur, les conditions aux limites pour les équations de la chaleur et de la masse se restreignent aux échanges convectifs thermiques et massiques.

2.4. SCHEMA DE RESOLUTION NUMERIQUE

La mise en équation des transferts couplés a abouti à un système d'équations différentielles partielles non linéaires à résoudre sur un domaine continu. La discrétisation des équations permet d'obtenir un système d'équations linéaires sur un domaine discret. Pour correspondre aux schémas numériques de TEB, la méthode des différences finies est sélectionnée et un schéma Implicite-Explicite (IMEX) est

imposé, car il permet de ne pas effectuer de sous-itérations et d'être stable numériquement (Gasparin et al. 2019). 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. Ensuite, ces équations peuvent être écrites sous la forme d'un système matriciel. La résolution de ce système est effectuée en appliquant la méthode de décomposition LU. 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).

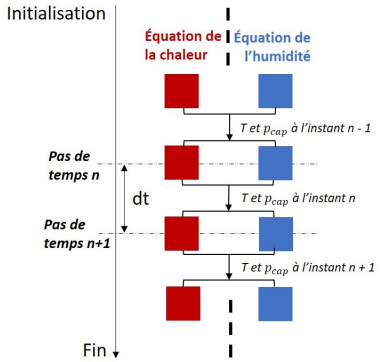

Figure 1 : Approche de résolution numérique découplée

Or la température intervient dans l'équation de l'humidité. Elle ne sera donc pas considérée comme une inconnue et sera considérée comme égale aux valeurs du pas de temps précédent, et inversement pour la pression capillaire dans l'équation de l'humidité. Les équations discrétisées suivantes sont alors obtenues, pour la résolution du pas de temps n+1 et au niveau du nœud i.

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{C_{TT}} \frac{T_i^{n+1}-T_i^n}{\Delta t} + \boldsymbol{C_{TP}} \frac{p_{c,i}^n - p_{c,i}^{n-1}}{\Delta t} + \left[\frac{(K_{TT})_{i-1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(T_i^{n+1}-T_{i-1}^{n+1}\right)}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{TT})_{i+1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(T_{i+1}^{n+1}-T_i^{n+1}\right)}{\Delta x_{i+1/2}}\right] + \left[\frac{(K_{TP})_{i-1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(p_{c,i}^n - p_{c,i-1}^n\right)}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{TP})_{i+1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(p_{c,i+1}^n - p_{c,i}^n\right)}{\Delta x_{i+1/2}}\right] \quad \textbf{(9)}$$

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{C_{PT}} \frac{T_i^n-T_i^{n-1}}{\Delta t} + \boldsymbol{C_{PP}} \frac{p_{c,i}^{n+1} - p_{c,i}^n}{\Delta t} + \left[\frac{(K_{PT})_{i-1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(T_i^n-T_{i-1}^n\right)}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{PT})_{i+1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(T_{i+1}^n-T_i^n\right)}{\Delta x_{i+1/2}}\right] + \left[\frac{(K_{PP})_{i-1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(p_{c,i}^{n+1}-p_{c,i-1}^{n+1}\right)}{\Delta x_{i-1/2}} - \frac{(K_{PP})_{i+1/2}^n}{\Delta x}\frac{\left(p_{c,i+1}^{n+1}-p_{c,i}^{n+1}\right)}{\Delta x_{i+1/2}}\right] \quad \textbf{(10)}$$

Avec $C_{TT} = c_{p,mat}\,\rho_{mat} + c_{p,l}\,w_l$, $C_{TP} = c_{p,l}(T - T_{ref})\frac{dw}{dp_c}$, $C_{PP} = \frac{dw}{dp_c}$, $C_{PT} = 0$, $K_{TT} = \lambda + L_v K_{PT}$, $K_{TP} = c_{p,l}(T - T_{ref})K_l + L_v K_v \frac{p_v}{R_v T \rho_l}$, $K_{PP} = K_l + K_v \frac{p_v}{R_v T \rho_l}$, $K_{PT} = K_v \frac{p_v}{R_v T^2}\left(L_v - \frac{p_c}{\rho_l}\right)$, $\Delta x_{i-1/2} = (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2$, $\Delta x_{i+1/2} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})/2$, $K_{**i-1/2} = (K_{**i} + K_{**i-1})/2$ *et* $K_{**i+1/2} = (K_{**i} + K_{**i+1})/2$.

La discrétisation des conditions aux limites se fait de la manière suivante :

$$\boldsymbol{q_{CL}^{n+1}} = h_{conv,th}\left(T_{air}^{n+1} - T_{surf}^{n+1}\right) + L_v h_{conv,m}\left(p_{v,air}^{n+1} - p_{v,surf}^n\right) + j_{rain} c_{p,l}\left(T_{air}^{n+1} - T_{ref}\right) + \alpha q_{CLO,inc} - \varepsilon\sigma\left({T_{surf}^n}^4 - {T_{équ}^{n+1}}^4\right) \quad \textbf{(11)}$$

$$\boldsymbol{j_{CL}^{n+1}} = \boldsymbol{h_{conv,m}}\left(p_{v,air}^{n+1} - p_{v,surf}^n\left(1 + \frac{1}{\rho_l R_v T_{surf}^n}\left(p_{c,surf}^{n+1} - p_{c,surf}^n\right)\right)\right) \quad \textbf{(12)}$$

Avec $h_{conv,th}$ le coefficient convectif de chaleur ($\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$), $h_{conv,m}$ le coefficient convectif de masse ($\mathrm{kg.m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}}$), α le coefficient d'absorption, $q_{CLO,inc}$ le flux radiatif à courte longueur d'onde incident ($\mathrm{W.m^{-2}}$) et ε l'émissivité de la façade.

Les grandeurs au niveau des surfaces sont approximées par leur valeur au nœud le plus proche.

Pour assurer la stabilité numérique, le pas de temps (généralement de cinq minutes) est diminué à dix secondes dans les moments les plus critiques, c'est-à-dire lorsque la pluie incidente à la façade est

élevée, lorsque des oscillations numériques ou des variations brusques sont observées sur la température et la pression capillaire au niveau des surfaces ou encore sur la teneur en eau intégrée dans la paroi. De même, lorsqu'une valeur positive est obtenue pour la pression capillaire, le pas de temps est diminué et si ce n'est pas suffisant, la pression capillaire est remplacée par une valeur seuil.

2.5. METHODE D'EVALUATION

L'évaluation du modèle se concentre sur la vérification des données utilisées par TEB pour calculer les échanges convectifs avec l'ambiance intérieure et l'environnement urbain extérieur ainsi que la cohérence globale des données simulées à l'intérieur de la paroi. Ainsi, six variables sont retenues pour évaluer l'outil : la température et la pression de vapeur au niveau de la surface intérieure, la température et la pression de vapeur au niveau de la surface extérieure ainsi que la température moyenne dans la paroi et la teneur en eau intégrée sur l'ensemble de la paroi. Pour vérifier l'évolution temporelle de ces six variables, les résultats obtenus sont comparés à ceux de Delphin, un outil de référence validé et largement utilisé. L'erreur effectuée par notre méthode est alors estimée par rapport à cette référence.

2.6. CAS ETUDIES

L'évaluation se fait sur des parois dont la composition diffère par le nombre de couches et les propriétés des matériaux. Ainsi, l'outil est testé pour des parois traditionnelles ou plus modernes, associées à des systèmes d'isolations imperméables, hygroscopiques ou encore capillaires actifs.

N°	Composition des parois de l'extérieur vers l'intérieur
1	Brique cadurcienne (0,4m) – Chaux-chanvre (0,1m)
2	Chaux-chanvre (0,1m) – Brique cadurcienne (0,4m)
3	Brique cadurcienne (0,4m)
4	Chaux-chanvre (0,1m)
5	Brique cadurcienne (0,4m) – Silicate de calcium (0,1m)
6	Brique cadurcienne (0,4m) – Laine minérale (0,1m) – Pare-vapeur (0,001m) – Plaque de plâtre (0,01m)
7	Enduit à la chaux (0,001m) – Laine minérale (0,1m) – Brique cadurcienne (0,4m)
8	Terre crue (0,2m)
9	Béton (0,2m)
10	Enduit (0,015m) – Polystyrène expansé (0,1m) – Béton (0,2m)
11	Béton (0,2m) – Laine minérale (0,1m) – Pare-vapeur (0,001m) – Plaque de plâtre (0,01m)
12	Brique ancienne (0,215m)
13	Brique ancienne (0,215m) – Pare-vapeur perforé (0,001m) – Mousse phénolique (0,05m) – Pare-vapeur (0,001m) – Plaque de plâtre (0,0125m)
14	Brique ancienne (0,215m) – Colle (0,0065m) – Silicate de calcium (0,14m) – enduit à la chaux (0,004m)
15	Brique ancienne (0,215m) – Colle (0,008m) – Fibre de bois (0,1m) – Plâtre (0,012m)

Tableau 1 : Détails de la composition des parois étudiées

Les caractéristiques de la terre crue sont issues de la publication de (Soudani et al. 2016) et celles de la brique cadurcienne et du chaux-chanvre sont les résultats de la caractérisation des matériaux du living-lab de Cahors (Claude 2018). Les autres matériaux sont extraits de la base de données de Delphin.

Toutes les parois présentées dans le tableau ont été simulées dans le climat de Cahors. La méthode numérique est également évaluée dans des climats plus extrêmes, pour tester ses limites. Les parois n°1 et 10 ont été évaluées dans deux climats supplémentaires : le climat désertique (chaud et sec) d'Assouan (Egypte) et le climat tropical (chaud et humide) de Manaus (Brésil). Concernant les conditions intérieures, elles sont considérées constantes à une température de 20°C et une humidité relative de 50%.

2.7. ANALYSE DE SENSIBILITE AU MAILLAGE

L'objectif de cette partie est de trouver un compromis pour la discrétisation spatiotemporelle, car TEB résout actuellement les transferts de chaleur dans la paroi avec un pas de temps constant de cinq

minutes et un total de cinq nœuds, alors que les outils de transferts couplés utilisent généralement des pas plus fins et parfois variables. Concernant la discrétisation spatiale, il est préconisé d'appliquer une taille de maille plus faible près des bords et à l'interface entre les couches de matériaux, puisque ces zones sont généralement soumises à de plus grandes variations que le centre des matériaux.

La solution proposée comporte un pas de temps de cinq minutes avec des sous pas de temps à dix secondes dans les moments critiques pour la convergence. Concernant la discrétisation spatiale, différents maillages ont été testés, ils se différenciaient par le nombre de nœuds et la taille de la première maille. Suite à ces tests, un compromis a été trouvé et un maillage à neuf nœuds avec une première maille de 5mm a été retenu. Il ne comporte aucun affinement du maillage à l'interface entre deux couches de matériaux.

Les simulations pour chaque paroi et pour les différents climats sont effectuées sur une année complète. L'écart entre les résultats du schéma proposé et ceux de Delphin est évalué à chaque pas de temps. Pour présenter les résultats de manière concise, la durée au cours de laquelle l'écart dépasse une certaine valeur seuil (voir Tableau 2) est calculée. Les résultats (Tableau 3) d'une simulation sont jugés insatisfaisants, lorsque l'écart dépasse la valeur seuil plus de 10% du temps pour au moins une des six variables (soit quand une case rouge est présente sur une ligne.)

	T [°C]	P_{vap} [Pa]	w [kg/m³]
Type d'erreur	*absolue*	*relative*	*relative*
Valeur seuil	1	5%	10%

Tableau 2 : Valeurs seuils pour l'écart entre l'outil proposé et Delphin

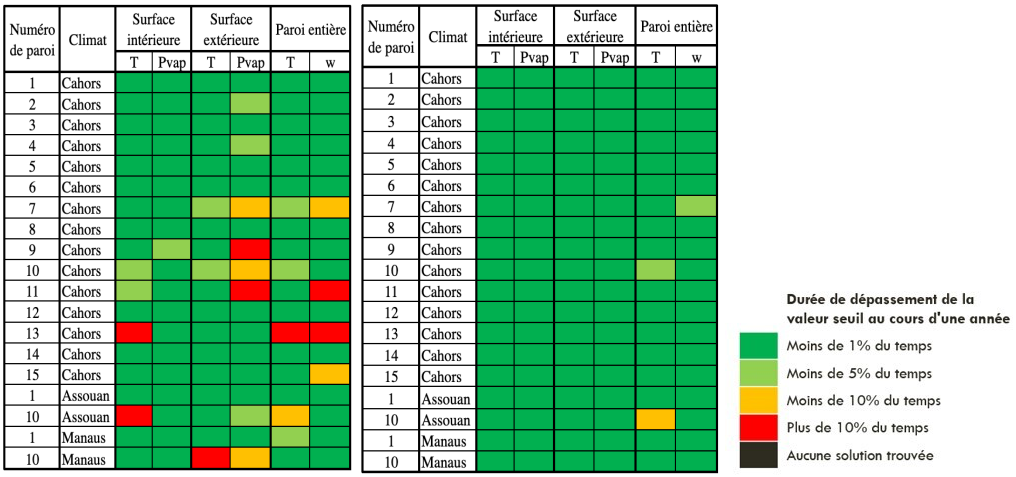

Tableau 3 : Durée de dépassement pour chaque simulation avec un maillage à 9 nœuds (à gauche) et un maillage affiné (à droite)

Le schéma proposé fonctionne généralement bien pour des parois composées d'une ou deux couches de matériaux et permet de simuler efficacement les matériaux perméables, hygroscopique et capillaires actifs, qui sont les caractéristiques des matériaux traditionnels et biosourcés.

Cinq simulations sur dix-neuf ont des résultats en partie insatisfaisants, ce qui permet de trancher sur les limites du schéma numérique associé à un maillage grossier. Les résultats sont moins satisfaisants pour des solutions contemporaines, comme le béton seul ou isolé par l'extérieur ou l'intérieur. De même, la méthode proposée ne permet pas toujours de simuler efficacement les parois composées de plus de quatre couches de matériaux, par exemple la paroi n°13. Le nombre de nœuds n'est pas suffisant pour décrire les fortes variations induites par les changements de matériaux.

Les cinq simulations, n'ayant pas obtenus des résultats satisfaisants avec un maillage grossier, sont effectuées à nouveau avec un maillage plus fin, qui se caractérise par une première maille de 1 mm, un taux d'accroissement de 1.5, une dimension maximale de maille de 10cm ainsi qu'un raffinement des mailles à l'interface entre les couches de matériaux. Les résultats obtenus (Tableau 3 à droite) montrent que le maillage ainsi affiné permet d'obtenir des résultats satisfaisants pour l'ensemble des simulations.

2.8. DISCUSSION

Cette sous-partie présente des extraits de résultats, pour la paroi brique/chaux-chanvre (n°1), au mois d'août 2016, dans le climat de Cahors. Le schéma numérique proposé associé à un maillage à neuf nœuds est confronté à l'outil de référence Delphin. Les Figures 2 et 3 montrent des résultats très satisfaisants pour l'évolution temporelle de la température et de la pression de vapeur au niveau de la surface extérieure, ainsi que pour l'évolution spatiale de la température et de la teneur en eau dans la paroi. Ces graphiques confirment la pertinence du maillage à neuf nœuds pour décrire ce type de parois.

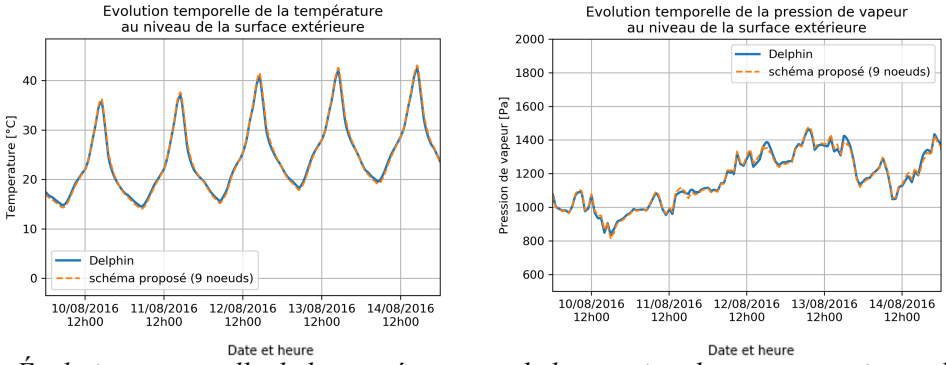

Figure 2 : Évolution temporelle de la température et de la pression de vapeur au niveau de la surface extérieure du 10 au 14 août 2016 à Cahors

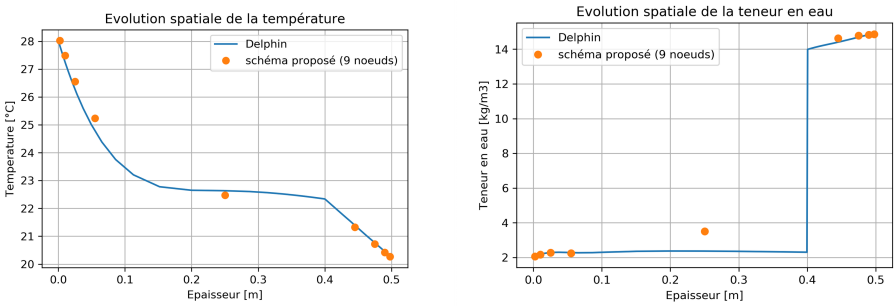

Figure 3 : Profil de la température (à droite) et la teneur en eau (à gauche) dans la paroi brique/chaux-chanvre le 23 août 2016 à midi à Cahors

Cette étude s'inscrit dans un projet plus global, dont le but est d'évaluer la réhabilitation des centres historiques, en se basant sur le quartier médiéval de Cahors. Ainsi, les résultats numériques obtenus, seront également confrontés à des données expérimentales mesurées dans le living-lab de Cahors, dont les parois de briques anciennes ont été rénovées par l'intérieur à l'aide de chaux-chanvre (Claude 2018).

3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'intégration des transferts couplés de masse et de chaleur dans un modèle à l'échelle urbaine, nécessite d'effectuer des compromis. Un schéma de résolution numérique simplifié et totalement implicite a été proposé. La simplification passe par une approche de résolution numérique découplée. Un critère de convergence associé à deux conditions permet de gérer les moments les plus critiques. Le schéma numérique a été évalué dans trois climats différents et pour des discrétisations spatiales plus ou

moins fines. En fonction du nombre de couches et des propriétés des matériaux, un maillage plus ou moins grossier est nécessaire. Dans le cas des matériaux très perméables, comme ceux de Cahors, un maillage composé de neuf nœuds peut être utilisé. En revanche, pour des parois plus contemporaines comprenant du béton isolé ou non, il est nécessaire d'appliquer un maillage plus fin, pour obtenir des résultats satisfaisants avec le schéma numérique proposé.

Les perspectives de ce travail sont d'intégrer la méthode de résolution optimale au modèle TEB et de réaliser des simulations énergie/climat intégrant le comportement hygrothermique des parois anciennes et biosourcées, à l'échelle urbaine. L'objectif final sera de conclure sur la solution optimale pour la rénovation des parois anciennes, par rapport au confort d'été ainsi qu'aux enjeux microclimatiques et énergétiques.

4. BIBLIOGRAPHIE

Berger, Julien, Nathan Mendes, Sihem Guernouti, Monika Woloszyn, et Francisco Chinesta. 2017. « Review of Reduced Order Models for Heat and Moisture Transfer in Building Physics with Emphasis in PGD Approaches ». Archives of Computational Methods in Engineering 24 (3): 655-67. https://doi.org/10.1007/s11831-016-9184-1.

Claude, Sophie. 2018. « Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain ». Thèse de doctorat, INSA de Toulouse.

Delgado, João M. P. Q., Eva Barreira, Nuno M. M. Ramos, et Vasco Peixoto de Freitas. 2012. Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics. SpringerBriefs in Computational Mechanics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35003-0.

Gasparin, Suelen, Julien Berger, Denys Dutykh, et Nathan Mendes. 2019. « An innovative method to determine optimum insulation thickness based on non-uniform adaptive moving grid ». Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 41 (4): 173. https://doi.org/10.1007/s40430-019-1670-6.

Masson, Valéry. 2000. « A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models ». Boundary-Layer Meteorology 94 (3): 357-97. https://doi.org/10.1023/A:1002463829265.

Masson, Valéry, Colette Marchadier, Geneviève Bretagne, Marie-Pierre Moine, Thomas Houet, Marion Bonhomme, Thierry Morel, et al. 2013. « Projet ACCLIMAT - Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine ». Research Report.

NF EN ISO 15927-3. 2009. « Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques - Partie 3 : calcul d'un indice de pluie battante pour surfaces verticales à partir de données horaires de vent et de pluie ».

Nicolai, Andreas. 2007. « Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials ». Mechanical and Aerospace Engineering Theses and Dissertations. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2016.2088.

Osanyintola, Olalekan F, et Carey J Simonson. 2006. « Moisture Buffering Capacity of Hygroscopic Building Materials: Experimental Facilities and Energy Impact ». Energy and Buildings, 13.

Soudani, Lucile, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Monika Woloszyn, Pierre-Antoine Chabriac, Henry Wong, et Anne-Cécile Grillet. 2016. « Assessment of the Validity of Some Common Assumptions in Hygrothermal Modeling of Earth Based Materials ». Energy and Buildings 116 (mars): 498-511. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025.