

Transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les bâtiments climatisés

Abdelkrim TRABELSI¹, Rafik BELARBI^{1*}, Menghao QIN²

¹Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment
Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1

²National Institute of Standards and Technology,

100 Bureau Drive, Mail Stop 8633, Gaithersburg, MD 20899, USA

* (auteur correspondant: rbelarbi@univ-lr.fr)

Résumé - L'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les enveloppes des bâtiments a révélé l'importance de la prise en compte de ces phénomènes à l'échelle de la paroi pour une bonne évaluation du comportement des ambiances intérieures et une pour meilleure prédiction de la performance globale des bâtiments climatisés. Tout d'abord, une modélisation des transferts de chaleur et d'humidité a été entreprise à l'échelle des matériaux. Ce modèle a été, ensuite, implémenté sous "Matlab-Simulink" puis validé en utilisant des outils de validation variés.

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

A_j	surface d'échange, m^2
C_m	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_p	capacité massique spécifique, $m^3.kg^{-1}$
$g_{m,j}$	flux d'humidité, $kg.s^{-1}.m^{-2}$
h_{lv}	chaleur latente d'évaporation, $J.kg^{-1}$
M	taux de production d'humidité, $kg.h^{-1}$
n	taux de renouvellement d'air, h^{-1}
Q	flux de chaleur, W
v	teneur en vapeur, $kg.m^{-3}$
v_0	teneur en vapeur de l'air ext, $kg.m^{-3}$
v_i	teneur en vapeur de l'air int, $kg.m^{-3}$
V	volume, m^3
T	température, K

Symboles grec

ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
σ	ration de transfert de vapeur
γ	chaleur de sorption désorption, $kJ.kg^{-1}$
δ	coeff. de diffusion d'humidité, $m^2.s^{-1}$
ε	coeff. de gradient thermique, $kg.m^{-3}.K^{-1}$
α_j	coeff. d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$

Indices et exposants

<i>in</i>	intérieur
<i>prod.</i>	production
<i>sol.</i>	rayonnement solaire
<i>ven.</i>	ventilation

1. Introduction

L'accumulation de l'humidité dans les matériaux poreux du bâtiment peut engendrer non seulement la réduction des performances thermiques de l'enveloppe mais aussi la corrosion des composants métalliques et la dégradation de la structure. De plus, la migration d'humidité à travers les parois du bâtiment a un impact significatif sur l'humidité des ambiances et sur la charge de climatisation. La présence excessive de l'humidité dans les locaux est le résultat des échanges de chaleur et d'humidité à travers les parois du bâtiment et dans l'air environnant. Plusieurs modèles mathématiques de transfert d'humidité dans le bâtiment ont été proposés pour prédire l'incidence de l'humidité sur le comportement des ambiances habitables et sur la consommation énergétique des bâtiments. En effet, plusieurs codes de calcul tels qu'EnergyPlus, TRNSYS, DOE-2 ont été validés. Cependant, peu d'environnements de calculs intègrent dans la prédiction l'interaction hygrothermique entre l'enveloppe du bâtiment et l'air intérieur.

Pour y remédier, un modèle dynamique pour la prédiction du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans les matériaux et à l'interface matériaux-ambiance a été développé. Le modèle proposé prend en considération les principaux effets hygrothermiques : les sources et puits de

chaleur et d'humidité dans les différentes zones du bâtiment, l'interaction paroi-ambiance, la diffusion et la sorption/désorption de la vapeur d'eau dans les parois, les apports énergétiques dus à l'ensoleillement à travers les fenêtres et murs etc. Le modèle ainsi obtenu a été implémenté sous MATLAB-Simulink puis validé en utilisant une série d'outils de validation.

2. Modélisation du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans le bâtiment

2.1. Equations régissant le transfert au sein de l'enveloppe

Il existe plusieurs phénomènes mis en jeu lors des transferts hygrothermiques. On note principalement la diffusion, la capillarité et l'adsorption. Le transfert en phase vapeur dans un milieu poreux s'opère par diffusion sous gradient de concentration grâce à l'agitation de la matière par des mouvements moléculaires aléatoires. Le transfert par capillarité se produit quand à lui en phase liquide par l'intermédiaire des forces capillaires d'interactions entre les phases fluides et d'interaction entre phases fluides et matrice solide.

Un autre phénomène déterminant dans les transferts hygrothermique est l'adsorption. Il s'agit de la condensation de molécules sur la surface du matériau solide. Les molécules adsorbées sont faiblement liées au solide par des forces intermoléculaires d'attraction. La courbe caractéristique décrivant ce phénomène est appelée courbe d'adsorption ou courbe de rétention. Elle permet non seulement de rendre compte de la capacité du matériau à retenir/libérer de l'humidité mais aussi de relier deux grandeurs physiques essentielles dans les transferts hygrothermique à savoir la teneur en eau et l'humidité relative. Pour tenir compte des phénomènes listés ci-dessus, on propose le modèle suivant :

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho C_m (\sigma h_v + \gamma) \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho C_m \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

C'est un modèle qui est basé sur les travaux de LUIKOV [1, 2], il permet de prédire la distribution de la température et de la teneur en vapeur d'eau au sein d'un matériau poreux. Ce modèle a été obtenu à partir des équations de bilan de masse et d'énergie. Il est bâti sur des hypothèses reflétant la physique des phénomènes de transfert et permettant d'évaluer avec précision, à partir des essais expérimentaux faciles à mettre en œuvre, les paramètres d'entrée principaux : le coefficient de diffusion d'humidité δ et le coefficient de gradient thermique ε . La teneur en vapeur d'eau a été choisie comme moteur de transfert car elle représente une variable continue.

L'un des paramètres du modèle le plus déterminant est le coefficient de diffusion d'humidité. Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluer, dans le présent travail nous avons opté pour la méthode, à la fois numérique est expérimentale, proposée par Belarbi *et al.* [3]. Elle consiste à la résolution des équations de bilan d'humidité dans le cas isotherme et grâce à l'utilisation d'un essai gravimétrique qui consiste à suivre l'évolution relative de la masse pour différents paliers d'humidité relative, allant de l'état de saturation 100 % à l'état sec 0%, ce paramètre est déduit. La figure 1 représente une comparaison entre les valeurs expérimentales de suivi de masse et celle obtenue par la simulation suite à l'utilisation du coefficient de diffusion d'humidité déduit par notre approche. On constate un bon accord entre les résultats expérimentaux et la simulation. Ce qui nous amène à conclure que la forme

mathématique du modèle proposé (équations 2) permet de reproduire le séchage par convection entre deux paliers d'humidité relative.

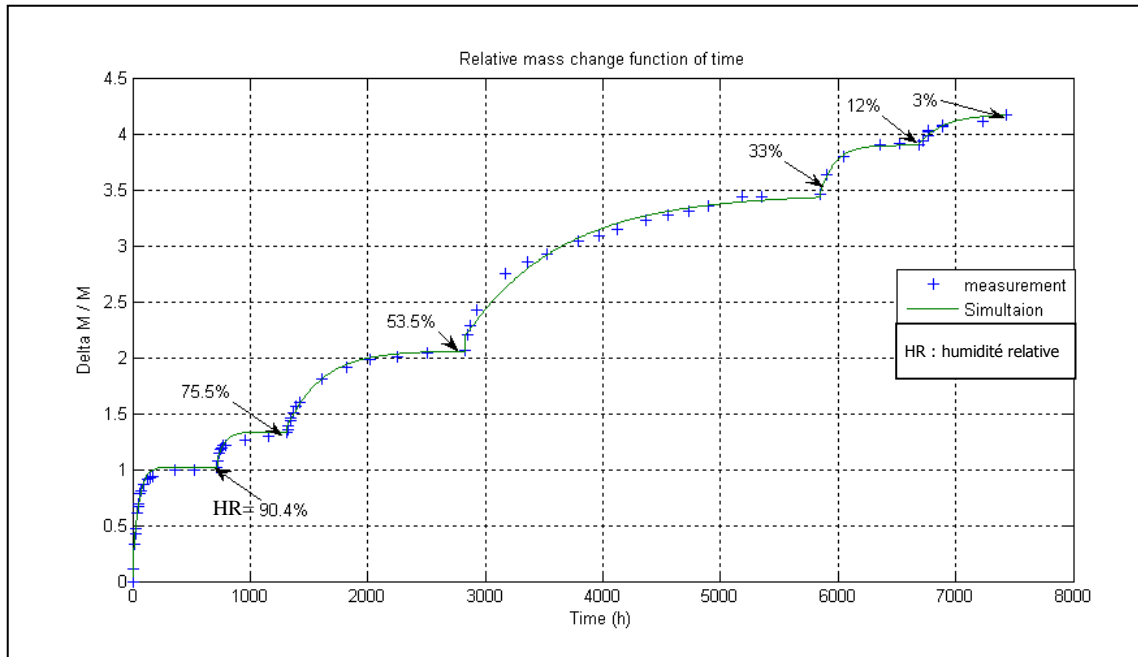


Figure 1 : suivi de l'évolution relative de la masse en fonction du temps

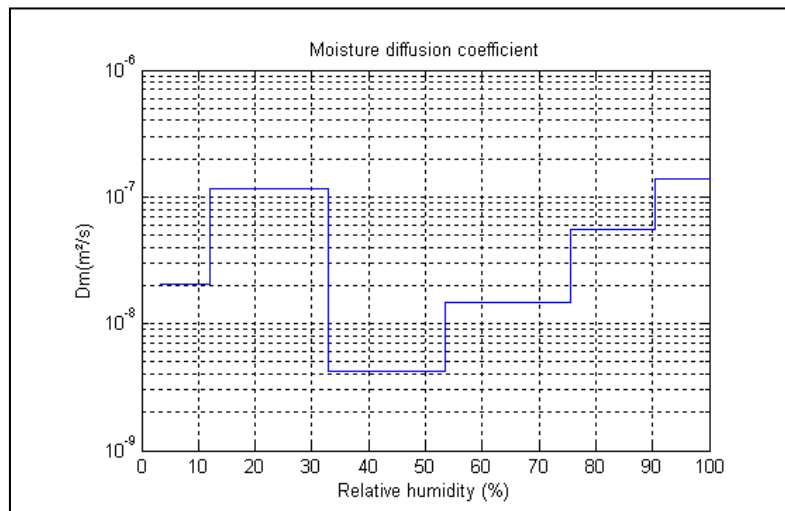


Figure 2 : coefficient de diffusion d'humidité apparent déduit à partir du suivi de masse lors d'un séchage sous gradient d'humidité relative

La figure 2 représente la variation du coefficient de diffusion d'humidité en fonction de l'humidité relative. En tout nous obtenons 6 valeurs de coefficients de diffusion d'humidité, ce qui correspond au nombre de paliers d'humidité relative étudié. En effet pour chaque palier le coefficient de diffusion est supposé constant. Par exemple, si on se trouve dans une gamme d'humidité relative comprise entre 33% et 53% alors le coefficient de diffusion est pris constant, il est égal environ à 3×10^{-9} m²/s. Le caractère non linéaire de l'évolution de cette grandeur s'explique par la nature des phénomènes de transferts engendrés. En effet, pour les faibles humidités relatives le transfert est contrôlé par la diffusion de la vapeur d'eau en revanche, pour les forte humidités relatives, il est contrôlé par l'écoulement en phase liquide. Entre ces deux régimes de transfert on constate des valeurs plus faibles pour le coefficient de

diffusion d'humidité, ceci traduit la présence de phases non continues avec emprisonnement d'air, ce qui réduit la cinétique de transfert.

2.2. Conditions aux limites

Le modèle composé des équations 1 et 2 suppose que la surface extérieure du mur est exposée à un échange convectif de masse et de chaleur avec l'air extérieur, au rayonnement solaire, au transfert de chaleur latente, à l'air et à la pluie. Tous les effets extérieurs sont pris en compte à travers une température d'air équivalente de la surface extérieure [4]. La surface intérieure du mur est exposée à un échange convectif de masse et de chaleur, des radiations de grande longueur d'onde avec les autres surfaces, un transfert de chaleur latente avec l'air intérieur. Tous ces effets sont pris en compte à travers une température d'air équivalente de la surface intérieure.

Suivant le problème spécifique étudié, le système d'équations aux dérivées partielles traduisant les échanges couplés de chaleur et d'humidité peut être traité suivant une des deux approches : analytique et numérique. Dans le cas où les propriétés du matériau sont constantes et vue le caractère linéaire des équations, le problème peut être résolu par une approche analytique comme celle proposée par Qin *et al.* [4]. Dans le présent article, le coefficient de diffusion est dépendant de l'humidité, le problème non linéaire est résolu numériquement sous MATLAB-Simulink.

2.3. Bilan de chaleur et de masse de l'ambiance

La température et l'humidité relative d'une ambiance climatisée sont évaluées en prenant en compte le gain de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment, les sources intérieures est les équipements HVAC etc. les équations 3 et 4 régissent les transferts dans l'ambiance

Le bilan de chaleur suppose que : (1) la température de l'air est uniforme, (2) toutes les radiations sont distribuées de sorte que les surfaces absorbent la même quantité par unité de surface, (3) les coefficients d'échange convectif et radiatif sont les mêmes pour toutes les surfaces. Le bilan de chaleur peut être décrit comme suit :

$$\rho \cdot C_p \cdot V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_j A_j \alpha_j (T_j - T_i) + Q_{sol.} + Q_{in} + n \cdot V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) + Q_{ven.} \quad (3)$$

Le bilan d'humidité, quand à lui, peut être exprimé comme suit :

$$V \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum_j A_j g_{in,j} + M_{prod.} + M_{HVAC} + n \cdot V \cdot (v_o - v_i) + M_{ven.} \quad (4)$$

3. Validation du modèle

L'agence internationale pour l'énergie (AIE) a publié une série de cas tests pour la validation des simulations thermique du bâtiment, elle comprend principalement : IEA BESTEST (1995), IEA HVAC-BESTEST (2000) et IAE IEA ECBCS Annex 21 / SHC Task 12 etc. Récemment, IEA Annex 41 a rajouté plusieurs études sur l'humidité des ambiances habitables et l'enveloppe du bâtiment dans le bâtiment BESTEST utilisé dans IEA ECBCS Annex 21/SHC Task 12. Ces outils de validation, sont utilisés pour valider le présent modèle. Les mesures ont été réalisées dans Fraunhofer-Institut Fur Bauphysik, Allemagne. La chambre test a un plancher de 20 m² de surface et un volume de 50 m³. Les murs extérieurs sont composés de briques de 240mm d'épaisseur avec 100mm d'isolation extérieure. Les

murs et planchers de la chambre sont couverts d'un film standard en plastique de 12mm d'épaisseur. Les fenêtres en double vitrage sont exposées plein sud à 0.2 m du sol. La chambre est équipée de système de chauffage avec régulation et d'un système de ventilation et de production d'humidité. Des capteurs de température et des fluxmètres de chaleur sont fixés sur la surface intérieure des murs. L'essai est réalisé avec un taux de renouvellement d'air de 0.5 h^{-1} . Un taux de production d'hygrométrie de $0.5 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ est supposé avec des pics au matin et au soir ($8 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ de 6:00 à 8:00 et $4 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ de 16:00 à 22:00 chaque jour). On peut trouver une description plus détaillée du dispositif expérimental dans le rapport de l'IEA Annex 41 [6].

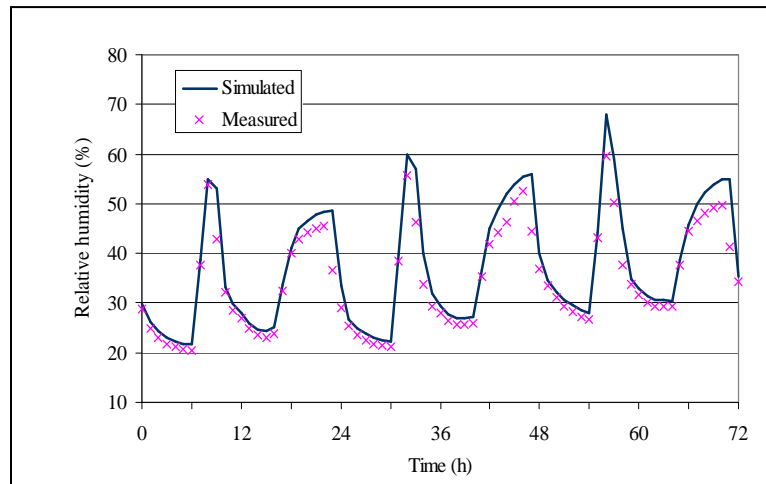


Figure 3 : comparaison des résultats de simulation avec les mesures expérimentales

La figure 3 montre que l'humidité relative de l'air intérieur calculée est légèrement supérieure à celle mesurée. Il est supposé que l'effet tampon d'humidité de l'enveloppe retarde la dynamique de l'équilibre dans l'essai. On constate néanmoins un bon accord entre les résultats de la simulation et les mesures issues de l'expérience. Par conséquent, le modèle présenté ci-dessus peut être utilisé avec assurance pour simuler des transferts de chaleur et d'humidité dans le bâtiment.

4. Simulation des transferts hygrothermiques

4.1. Présentation du cas d'étude

Après une première validation, le modèle est ainsi utilisé pour étudier l'effet des transferts couplés sur l'hygrométrie intérieure et sur la consommation énergétique du bâtiment. Pour cela, il a été supposé que la même chambre test utilisée pour la validation soit utilisée comme chambre d'hôtel. Elle a été supposée occupée uniquement durant la nuit de 20:00 à 8:00. Durant cette période d'occupation, la puissance du système de chauffage de 500 W a été considérée. De plus, une production d'humidité à l'intérieur de la chambre de $3 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ a été retenue. Durant la période d'inoccupation, la puissance de chauffage a été réduite à 120 W et la production d'humidité a été limitée à $0.5 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. La température et l'humidité relative de consigne du système de climatisation sont de $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et 60% respectivement. Il a été considéré que le système de climatisation fonctionne en période occupée uniquement.

4.2. Analyse des résultats et discussions

Des simulations ont été effectuées avec et sans prise en compte des transferts d'humidité dans les matériaux et à l'interface matériaux-ambiance. Les résultats obtenus sont présentés

dans les figures 4 et 5. Ces courbes montrent que le transfert hydrique et le phénomène de sorption/désorption à travers les parois du bâtiment ont des effets majeurs sur l'humidité relative des ambiances habitables. Dans le cas où ces phénomènes sont pris en compte, l'humidité relative de l'ambiance reste inférieure à 75% durant la période d'arrêt du système de climatisation. Cependant, dans le cas contraire, la valeur maximale de l'humidité relative dépasse 80%. Il a été constaté qu'une surévaluation induirait l'utilisation inutile de déshumidificateur (source de consommation d'énergie supplémentaire). D'autre part, la figure 4 montre que la température de l'air ambiant est sensiblement la même dans les deux cas, cela signifie que le transfert d'humidité dans le bâtiment a une influence significative sur la charge de climatisation latente et n'affecte pas énormément la charge de climatisation sensible.

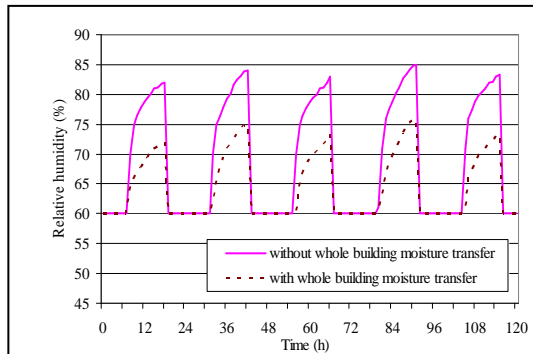


Figure 4 : Evolution des humidités relatives

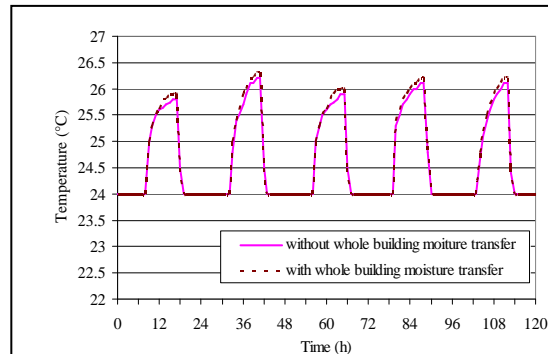


Figure 5 : Evolution des températures

5. Conclusions

Dans cet article, un modèle pour la prédiction des transferts hygrothermiques a été proposé. Il permet de coupler les transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe et dans les ambiances habitables. L'un des paramètres déterminants dans les transferts dans les parois est le coefficient de diffusion d'humidité, c'est un coefficient variable non linéaire fonction de l'humidité relative. La prise en compte du transfert couplé de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment a une influence sur l'humidité de l'air ambiant et sur la performance énergétique globale des bâtiments climatisés. Par conséquent, une meilleure conception de la climatisation du bâtiment passe par des outils de prise de décision qui tiennent compte du couplage chaleur/humidité, enveloppe/ambiance habitable.

Références

- [1] A. V. Luikov, *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, Oxford: Pergamon press, 1966.
- [2] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, L.O. Nilsson, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Porous Building Materials: Evaluation of Nonisothermal Moisture Transport Properties, *J. Mat. Sci.* 43-10 (2008), 3655-3663.
- [3] R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, M Qin., O. Omikrine, Development of simplified approach to model the moisture transfer in building materials, *Euro. J. Env. C. Eng.* 10-9 (2006), 1033-1048.
- [4] C. E. Hagentoft, *Introduction to Building Physics*, Studentlitteratur, Lund, Sweden, 2001.
- [5] M. Qin, R. Belarbi, A. Aït-Mokhtar, A. Seigneurin, An analytical method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials. *Int. Com. HAM Trans.* 33 (2006), 39-48.
- [6] M. Woloszyn, C. Rode, *Final Report of IEA ANNEX 41: Modeling Principles and Common Exercises*, ISBN 978-90-334-7057-8, 2008.