

Modélisation du Comportement Thermique d'une Maison Bois à l'Aide de Micromodèles Chaleur-Masse Distribués

Romain Rémond, Patrick Perré

AgroParisTech, UMR1093 (LERMAB), Engref, 14, Rue Girardet, 54000 Nancy.
remond@nancy-engref.inra.fr

RESUME. Il existe un couplage fort entre les transferts de masse et de chaleur au sein d'une paroi mais également entre les parois de l'enveloppe, via les échanges entre l'air intérieur et ces dernières. Cette complexité a été abordée en réalisant un modèle global à l'échelle de l'enveloppe qui utilise des micromodèles chaleur-masse comme module à l'échelle locale de la paroi. Dans ce code, chaque paroi a son authenticité propre (composition, conditions initiales, conditions aux limites, etc.). Quelques simulations ont été réalisées pour mettre en valeur le rôle joué par le bois dans la régulation du climat intérieur d'une construction. Les résultats montrent que les propriétés hygroscopiques du bois permettent d'améliorer le confort des occupants en réduisant considérablement l'amplitude des variations de l'humidité relative et en abaissant, dans une moindre mesure, l'intensité des pics de chaleur.

MOTS-CLÉS : maisons bois, transferts chaleur-masse, micromodèles distribués.

ABSTRACT. The building envelop contains all the complexity of coupled heat and mass transfer: The coupling exists within each single wall, via the strong coupling between heat and mass transfer, but also between walls, through the two-way interaction between the airflow and the walls. All this complexity is dealt with thanks to heat and mass distributed micromodels embedded in the building model. In this one, each wall has its own authenticity (components, initial conditions, limit conditions, etc.). Some simulations are presented to depict the effect of wooden walls on the indoor climate. Its hygroscopic properties reduce the intensity of RH variations that increases the comfort of the inhabitant, and reduce the intensity of hot peaks.

KEYWORDS : Wood building, heat and mass transfers, distributed micromodels.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte environnemental actuel, le bois apparaît comme un matériau de construction incontournable pour son caractère renouvelable stockant du carbone et pour sa faible conductivité thermique. La conception de la composition des parois de ce type de construction reste empirique et la garantie de leurs performances repose sur le savoir-faire et l'expérience du constructeur. Ce constat persiste, notamment pour le bâti à base de bois, malgré l'apparition de très nombreux logiciels dédiés à la thermique de l'habitat depuis une décennie. Les logiciels intégrant le couplage chaleur/masse, beaucoup plus réalistes pour les parois à base de bois, sont plus rares (Umidus (Brésil), Moist (EU), Wufi (Allemagne), Lesokai (Suisse)). Les professionnels de la construction bois sont donc demandeurs d'un outil d'aide à la conception pour optimiser le confort d'été et d'hiver des occupants selon l'emplacement et l'orientation géographique de la construction. Mais le développement d'un tel outil

présente plusieurs points de complexité: traitement du couplage chaleur/masse au sein des parois et également entre les parois de l'enveloppe via l'air intérieur (Xiaoshu, 2002, Kunzel *et al.*, 2005); forte dépendance des paramètres physiques caractérisant le matériau avec la teneur en eau et la température (Houngan *et al.*, 2006, Frandsen and Svensson, 2007); variabilité des propriétés des matériaux d'origine biologique ; définition difficile des conditions aux limites (Feustel, 1999, Mora, 2003).

Le premier point de complexité de cette liste a été abordé dans le cadre de ce travail. La formulation physique du modèle est présentée dans une première partie. Dans une seconde partie, le code sera utilisé pour étudier le confort hygrothermique d'une maison bois.

2. PHYSIQUE DU MODELE

2.1. MICROMODELE CHALEUR-MASSE A L'ECHELLE DE LA PAROI

2.1.1. Formulation physique

La modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans une paroi multicouche est réalisée à partir du modèle *TransPore*, initialement développé pour simuler le séchage d'une planche de bois. Les prédictions de cet outil numérique ont été validées à travers de nombreuses confrontations expérience/simulation et sur une large gamme de conditions climatiques pour différents matériaux à base de bois et de fibres. L'échelle de la modélisation est l'échelle macroscopique, pour laquelle le milieu poreux est assimilable à un milieu fictif, continu et homogène. Les bilans de masse, d'enthalpie et de quantité de mouvement sont écrits rigoureusement sur les 3 phases (solide, liquide et gazeuse) constituant le milieu poreux. Ces équations sont ensuite moyennées et sommées sur un volume élémentaire représentatif du milieu poreux (VER). L'état du milieu est ainsi défini par le champ spatial de trois variables : température, pression de gaz, et teneur en eau.

Au niveau des transferts de masse, ce code intègre la migration capillaire de la phase liquide, la diffusion-convection de la phase gazeuse, la diffusion de l'eau absorbée. Concernant le bilan énergétique, il intègre la conduction de la chaleur, la chaleur différentielle de sorption, la chaleur latente de vaporisation, la convection au sein du milieu poreux. Une description détaillée du modèle est présentée dans Perré et Dégiovanni, (1990), Perré et Turner (1999)

2.1.2. Les conditions aux limites

(a) Interface entre deux couches

La rareté des travaux sur les résistances de contact, thermique et massique, entre deux couches de mur nous a amené à les négliger dans ce travail. La continuité des flux de masse et de chaleur à l'interface a donc été supposée. Les flux à la frontière sont estimés en utilisant des coefficients phénoménologiques moyens calculés à partir d'une moyenne harmonique :

$$\bar{G}_{icv \leftrightarrow icv+1} = \left(\frac{a}{G_{icv}^{m1}} + \frac{(1-a)}{G_{icv+1}^{m2}} \right)^{-1} \quad [1]$$

Avec a est une pondération géométrique tenant compte de la taille respective des volumes de contrôle de part et d'autre de la frontière, G_{icv}^{mi} le coefficient phénoménologique du matériau mi dans le volume de contrôle icv du maillage.

(b) Sur la face d'échange extérieure du mur

$$j_{cs_i} = h_c \cdot (T_\infty - T_{s_i}) + j_{s_i}^{radD} \quad [2]$$

$$j_{vs_i} = \frac{h_m \cdot M_v}{R \cdot (T + 273)} \cdot (P_v^\infty - P_v^{s_i}) \quad [3]$$

Avec j_{vs_i} et j_{cs_i} , respectivement le flux de vapeur et de chaleur échangé entre la surface du mur i , S_i , et l'atmosphère extérieure ($W \cdot m^{-2}$), $j_{s_i}^{radD}$ désigne le flux de chaleur reçu par rayonnement direct du soleil par unité de surface du mur S_i ($W \cdot m^{-2}$). h_m et h_c sont respectivement les coefficients convectifs de transferts de masse ($m \cdot s^{-1}$) et de chaleur ($W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$) externes, \bar{T} est la température moyenne de la couche limite ($^\circ C$), M_v la masse molaire de vapeur d'eau ($g \cdot mol^{-1}$), T la température sèche ($^\circ C$) et P_v la pression partielle de vapeur (Pa). L'indice ∞ désigne l'ambiance extérieure et l'indice S_i la surface de la paroi i .

(c) Sur la face d'échange intérieure du mur

Des conditions aux limites similaires aux équations [2] et [3] sont écrites au niveau des surfaces intérieures. Mais, l'apport de chaleur par rayonnement sur la surface intérieure n'est pas considérée ($j_{s_i}^{radD} = 0$ dans l'équation [2]).

Ce micromodèle chaleur-masse permet de prédire l'évolution du champ de température et d'humidité dans une paroi multicouche, multicomposant. Le temps de calcul est d'environ 1 seconde, avec la version 1-D, pour simuler le comportement d'une paroi durant un mois, avec un PC standard équipé d'un microprocesseur Pentium IV de 3.2 GHz. Cette rapidité de calcul, nous permet d'utiliser ce modèle chaleur-masse comme module dans un modèle global calculant l'évolution du climat intérieur d'une maison à partir des flux de chaleur et de masse échangés avec les parois.

2.2. MODELE ENVELOPPE

Dans ce travail, une approche simplifiée à été adoptée à l'échelle de l'enveloppe. Le volume d'air intérieur est supposé unique (approche monozone) et parfaitement brassé. Cela revient à supposer que la température et l'humidité intérieure sont homogènes. Les équations de conservation sont écrites sur la masse d'air intérieur. Dans le modèle, chaque paroi de l'enveloppe a son authenticité (composition, conditions initiales, conditions aux limites, etc.).

2.2.1. Equations de conservation

- Bilans de masse

$$\frac{\partial \rho_v^{In}}{\partial t} \cdot V = (\rho_v^{Out} - \rho_v^{In}) \cdot V \cdot n + \sum_{i=1}^N S_i \cdot j_{vs_i} + \dot{m}_v \quad [4]$$

Avec n le taux de renouvellement du volume d'air intérieur (h^{-1}), V le volume interne de l'habitation (m^3), ρ_v^{In} et ρ_v^{Out} la masse volumique de vapeur respectivement à l'intérieur/extérieur ($kg.m^{-3}$), N le nombre de parois délimitant le volume, \dot{m}_v le flux massique de vapeur d'eau produit à l'intérieur du volume ($kg.s^{-1}$).

- *Bilans d'énergie*

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(V \cdot \left(\rho_v^{In} \cdot U_v^{In} + \rho_a^{In} \cdot U_a^{In} \right) \right) = \left(\left(\rho_v^{Out} \cdot U_v^{Out} + \rho_a^{Out} \cdot U_a^{Out} \right) - \left(\rho_v^{In} \cdot U_v^{In} + \rho_a^{In} \cdot U_a^{In} \right) \right) \cdot V \cdot n - \sum_{i=1}^N \dot{j}_{cs_i}^{In} \cdot S_i + \sum_{i=1}^N \dot{j}_{vs_i}^{In} \cdot S_i \cdot h_v^{In} + P_{Heat} + P_{Solar} + P_{People} - P_{floor} - P_{gl} \quad [5]$$

avec, P_{Heat} la puissance de chauffage/climatisation (W), P_{People} la puissance dégagée par l'activité des occupants (éclairage, équipements, etc.) (W), U_v et U_a l'énergie spécifique interne de la vapeur et de l'air ($J.kg^{-1}$). P_{Solar} , est l'apport solaire transmis par les vitrages. Ce rayonnement atteint les parois intérieures et la dalle de la construction. La chaleur reçue par le cloisonnement, non modélisé dans ce travail, est supposée être transmise intégralement à l'air intérieur.

$$P_{Solar} = \xi \cdot \sum_i \dot{j}_{s_i}^{radD} \cdot S_i^{glass} \cdot \varphi \quad [6]$$

Où S_i^{glass} est la surface de vitrage sur la paroi i (m^2), ξ la fraction d'insolation du lieu d'implantation (-), et φ le taux de transmission du rayonnement incident selon la nature du vitrage.

Le flux de chaleur échangé entre la masse d'air intérieur et la surface intérieure des vitres P_{gl} , ou encore avec la dalle en contact avec le sol P_{floor} sont estimés selon une expression simple de la thermique du bâtiment (Mazria, 2005).

La discrétisation des équations par rapport au temps est réalisée à l'aide de la méthode des volumes finis, selon une écriture implicite en temps. Le calcul est effectué pour maintenir une température intérieure fixe souhaitée pendant la période de chauffe, P_{Heat} et P_v^{In} sont alors les inconnues du système (eq. 4 et 5). Toutefois pour étudier le confort d'été de la construction, T_{∞}^{In} peut-être laissé libre et $P_{Heat} = 0$ (sans système de climatisation). Une méthode itérative est utilisée pour traiter la non-linéarité des équations dans ce dernier cas.

2.2.2. Traitement du couplage entre les deux échelles

Dans le modèle global, les équations de conservation [4] et [5] font intervenir les flux de chaleur et d'humidité échangés entre la face intérieure des parois et la masse d'air intérieur (locale → globale) (Fig. 1). En retour, les conditions climatiques intérieures sont utilisées dans chaque module *TransPore* (un module par paroi) comme des conditions aux limites (globale → locale). Cette procédure est itérée jusqu'à la fin du séchage. Chaque module *TransPore* a son pas de temps microscopique, ajusté automatiquement durant le calcul selon les conditions de convergence de l'algorithme de résolution des

équations de transport. Naturellement le couplage entre les deux échelles nécessite que le pas de temps global dt soit ajusté durant les calculs. Pour garder un temps de calcul raisonnable pour la simulation globale, tous les pas de temps sont contrôlés indépendamment. Généralement, le pas de temps local est différent d'une paroi à une autre et inférieur au pas de temps global. Cependant, quand les conditions de convergence sont favorables pour une paroi donnée, le pas de temps local peut-être plus grand que le pas de temps global. Dans cette situation, le séchage microscopique est réalisé pour un seul pas de temps égal au pas de temps global dt . Pour minimiser le temps de calcul global du code, le pas de temps microscopique, permettant la convergence, est mémorisé dans le but d'anticiper une augmentation possible du pas de temps global dt .

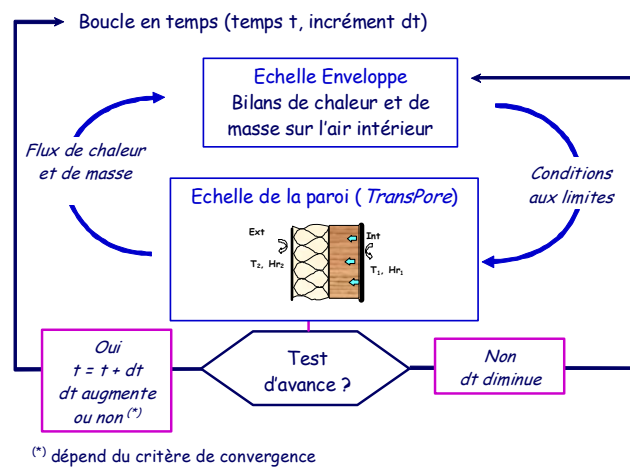


Figure 1. Couplage des deux échelles (Paroi-Enveloppe).

3. RESULTATS

La simulation a été effectuée sur la configuration d'une maison en bois massif (*Picea abies*), dont les dimensions sont précisées dans le tableau 1, composée de parois de panneaux de bois massif contrecollé de 162 mm d'épaisseur avec un pare-pluie sur la face extérieure ($S_D=0.1m$) et d'une toiture plate composée d'un feutre bitumé ($S_D=100m$), d'un panneau isolant de fibres de bois et d'un panneau contrecollé de bois massif, tous les deux de 140 mm d'épaisseur. Les données climatiques moyennes horaires de la ville de Lyon pour chaque mois ont été injectées dans le code. Concernant les conditions climatiques intérieures, la température est maintenue à 19°C pendant la période de chauffe et est laissée libre au cours de la période estivale. Pour tenir compte de l'activité humaine à l'intérieur de l'habitation (3-4 personnes ici), un apport d'énergie (9 kWh/j) et de vapeur d'eau (7.5 l/j) évolutif au cours de la journée est considéré. Un taux de renouvellement de l'air intérieur de 0.5 h⁻¹ est maintenu constant au cours de l'année. Il passe à 2.5 h⁻¹ si la température intérieure excède 24°C au cours des nuits d'été. Le coefficient de transfert de chaleur convectif est supposé égal à 17 W/m²/°C à l'extérieur et 8 W/m²/°C à l'intérieur. Les coefficients de transfert de masse résultant sont respectivement de 0.017 m/s et 0.008 m/s.

Tableau 1. Dimensions de la maison

	Nord	Est	Sud	Ouest	Toiture
Façade (m ²)	2.8×9	2.8×10	2.8×9	2.8×10	9×10
Vitrage (m ²)	2	6	4	6	0

La température et l'humidité relative de l'environnement intérieur ont un impact très fort sur le bien-être des occupants (Toftum et al., 1998(a)&(b), Simonson et al., 2002, Fang, 2004). La Figure 2 représente l'ensemble des couples température/humidité absolue du climat intérieur au cours d'une année pour deux configurations de maison: la première (i), en configuration normale, la seconde (ii), sans prise en compte des propriétés hygroscopiques du bois. L'hygroscopicité des parois (i) permet de réduire de 2/3 l'amplitude des variations de l'humidité relative obtenue dans la configuration (ii). Cette réduction permet aux occupants de bénéficier d'un climat proche de la zone de confort tout au long de l'année et d'éviter les problèmes pathologiques inhérents à une forte humidité relative intérieure (Figure 2). Remarquez que l'humidité relative simulée par le code est haute à cause des conditions météorologiques moyennes entrées dans le code. Le concept d'humidité relative moyenne à peu de sens lorsque la température varie (notamment les alternances jour/nuit). Ceci conduit à surestimer l'humidité relative intérieure au cours de la saison estivale. Au cours de la période de chauffe (points se situant à l'abscisse de 19°C sur la Figure 2), l'hygroscopicité du bois permet d'éviter d'avoir un climat intérieur trop sec.

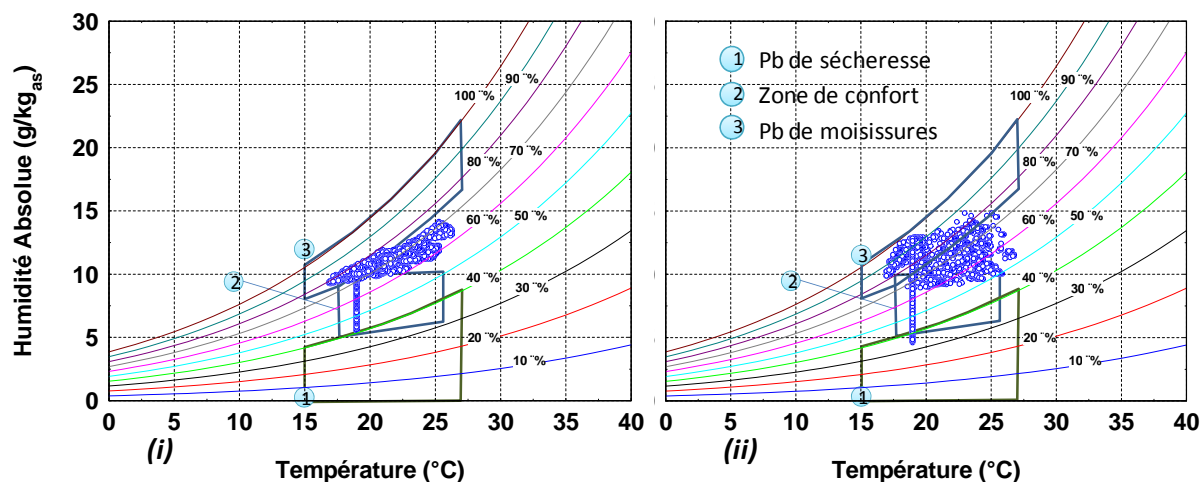


Figure 2. Ensemble des couples température/humidité relative au cours d'une année à l'intérieur de la maison en bois (i) et d'une maison identique mais composée de matériaux non-hygroscopiques (ii).
La zone de confort est tracée dans le diagramme de Mollier.

La couche externe de l'enveloppe (i) va s'humidifier durant les nuits d'été et sécher durant la journée. Le changement de phase qui l'accompagne va permettre de réduire la température de la couche extérieure de la paroi durant la journée. Ainsi, la température maximale atteinte en été dans la maison est plus faible de 0.6°C. Ce bénéfice est légèrement réduit lorsque l'on n'a pas de ventilation nocturne additionnelle. En effet, l'hygroscopicité du bois permet de déphaser le pic de chaleur de 20 min sup-

plémentaire. La ventilation nocturne va valoriser ce déphasage en écrétant le pic de chaleur d'autant plus fortement que le déphasage est important. Habituellement les constructeurs de ce type de maison ajoutent 80 mm de panneaux isolant de fibres de bois sur la face extérieure de la paroi. Ces panneaux denses vont renforcer cet effet car ils ont un coefficient de diffusion beaucoup plus élevé que le bois, ce qui va augmenter la profondeur de pénétration de l'humidité au cours des nuits d'été.

En observant la dynamique des transferts dans la paroi, on constate que les cycles de conditions climatiques diurnes n'affectent qu'une couche périphérique de la paroi d'environ 4 mm d'épaisseur. Dans cette couche, l'amplitude des variations de teneur en eau est supérieure ou égale à 0.1%. Les saisons en revanche vont provoquer des variations de la teneur en eau dans une couche périphérique plus épaisse d'environ 60 mm de chaque côté de la paroi (Figure 3). Cette couche épaisse va renforcer, dans une moindre mesure, le rôle du bois dans la régulation de l'humidité relative.

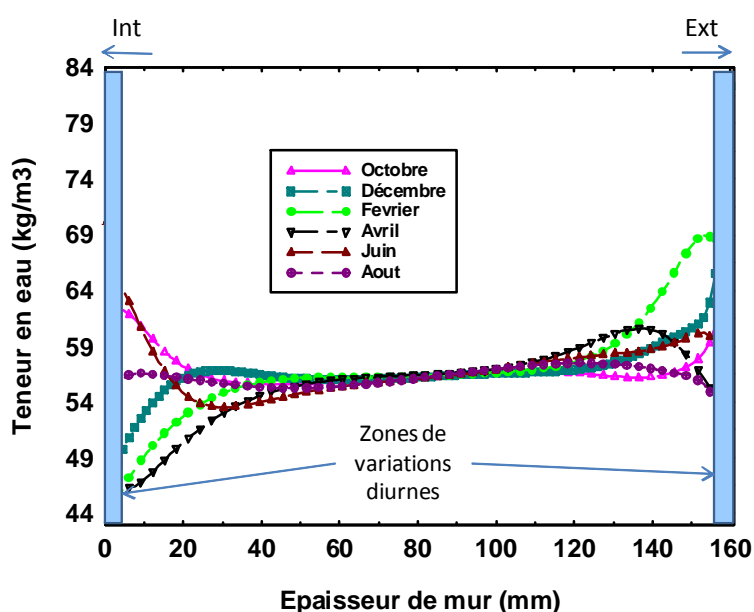


Figure 3. Evolution du champ de teneur en eau dans l'épaisseur du mur exposé au sud, le 1^{er} de chaque mois à 8h30.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons développé un code numérique multiéchelle à base de micromodèles distribués pour simuler la dynamique des transferts de masse et de chaleur dans une maison bois. Un modèle existant, *TransPore*, sert de base au micromodèle pour simuler le comportement de chaque paroi multicouche. La prise en compte du couplage des transferts de masse et de chaleur est essentielle afin de pouvoir simuler le comportement d'une paroi en bois. Le langage de programmation de cet outil, le Fortran, et la rapidité de calcul, 1 seconde pour simuler les transferts dans la paroi durant 1 mois, lui confère une grande interactivité et une intégration aisée dans un modèle globale simulant le comportement de l'enveloppe. Toutefois, ce model numérique sans concession par rapport à la physique du séchage présente encore des limites importantes pour acquérir un caractère prédictif au niveau de la physique du bâtiment. Par exemple, plusieurs phénomènes importants ne sont pas considérés dans le

modèle global, par exemple i) la thermodiffusion, essentielle au cours des périodes de chauffage, ii) les transferts non-fickiens, réduisant le flux diffusif pour les hautes humidités relatives, iii) l'hystérésis de l'isotherme de sorption/désorption des matériaux composants la paroi...

A l'échelle globale de l'enveloppe, une approche simplifiée, monozone, a été adoptée sur la masse d'air intérieure pour modéliser l'évolution des conditions climatiques.

Cette version du code a été utilisée pour mettre en exergue le rôle joué par le bois dans la régulation du climat intérieur d'une construction. Les résultats montrent que les propriétés hygroscopiques du bois permettent d'améliorer le confort des occupants en réduisant considérablement l'amplitude des variations de l'humidité relative et en abaissant, dans une moindre mesure, l'intensité des pics de chaleur. Cependant, des conditions météorologiques réelles devront être entrées dans le code, notamment pour voir l'effet régulateur d'un matériau hygroscopique, suite à un changement de teneur en vapeur absolue de l'air, à l'échelle de quelques jours.

La prochaine étape sera d'intégrer dans le modèle paroi des propriétés encore mal connues (thermodiffusion, transferts non-fickiens, *etc.*) et de valider ses prédictions par confrontations avec des mesures *in situ*. L'objectif à terme est de fournir aux professionnels de la construction bois un outil d'aide à la conception des parois, en complément/alternative aux approches simplifiées adoptées par la réglementation thermique en vigueur qui ne sont pas réalistes pour les matériaux hygroscopiques.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Fang L., Wyon D. P., Clausen G., Fanger P. O. (2004). Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality. *Indoor Air*, 14, p. 74–81.
- Feustel H. (1999). *COMIS*- An international multizone air-flow and contaminant transport model. *Energy and Buildings*, 30, p. 3–18
- Frandsen H., Svensson S. (2007). Implementation of sorption hysteresis in multi-fickian moisture transport. *Holzforschung*, 61, p. 693-701.
- Houngan A., Jacquin P., Perré P. (2006). Accurate determination of mass diffusivity in wood from absorption/desorption data obtained with a magnetic suspension balance. *15 th International Drying Symposium (IDS)*, p. 107-113.
- Kunzel H., Holm A., Zirkelbach D., Karagiozis A. (2005). Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, 78, p. 554–561.
- Mazria E. (2005). *Le guide de la maison solaire*. Parenthèses Editions.
- Mora L. (2003). *Prédiction des performances thermo-aérodynamiques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*. Thèse. Université de la Rochelle.

- Perré P., Degiovanni A. (1990). Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. *Journal of Heat Mass Transfer*, 33 (11), p. 2463-2478.
- Perré P., Turner I. (1999). A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42, p. 4501–4521.
- Simonson C., Salonvaara M., Ojanen, T. (2002). The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air*, 12, p. 243–251.
- Toftum, J., Jørgensen, A., & Fanger, P. (1998-a). Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin. *Energy and Buildings*, 28, p. 1-13.
- Toftum J., Jørgensen A.S., Fanger P.O (1998-b). Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy and Buildings*, 28, p. 15-23.
- Wadsö, L. (1994). Describing Non-Fickian water-vapour sorption in wood. *Journal of Materials Science*, 29, p. 2367-2372.
- Xiaoshu L. (2002). Modelling of heat and moisture transfer in buildings. I. Model Program. *Energy and buildings*, 24, p. 1033-1043.