

Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie

Monika Woloszyn^{1,*}, Carsten Rode², Jean-Jacques Roux¹

¹ CETHIL, Université de Lyon : Université Lyon 1, CNRS UMR5008, INSA Lyon
INSA Lyon, bat. Carnot, 69621 Villeurbanne cedex,
*monika.woloszyn@insa-lyon.fr

² Technical University of Denmark, Brovej, Bygning 118, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark

RESUME. L'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie (programme ESBCS) s'est intéressée aux transferts couplés thermo-hygro-aérauliques dans les bâtiments. L'objectif était d'une part d'améliorer les connaissances scientifiques et d'autre part d'analyser les effets de la réponse couplée thermo-hygro-aéraulique des bâtiments sur le confort des occupants, les consommations énergétiques et la durabilité de l'enveloppe. Ce projet de quatre ans (2004-2008) a rassemblé les scientifiques de 39 institutions et universités, situées dans 19 pays à travers le monde. Une partie importante de ce projet a été consacrée à la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments. Six exercices de simulation ont été conduits, donnant des éléments de validation des codes de calcul. Par ailleurs des travaux de modélisation ont été développés à plusieurs échelles : des modèles globaux simplifiés, à travers des modèles multi-zones, jusqu'à une approche CFD intégrée avec des codes de transferts couplés à travers les parois. Le présent article illustre certains aspects du travail réalisé dans le cadre de l'Annexe 41.

MOTS-CLÉS : transferts couplés, thermo-hygro-aéraulique, Agence Internationale de l'Energie

ABSTRACT. The purpose of International Energy Agency (IEA) ECBCS Annex 41, has been to advance development in modelling the integral Heat Air and Moisture (HAM) transfer processes that take place in "whole buildings". The aim was on one hand to improve scientific knowledge, and on the other hand to analyse the effects of coupled HAM behaviour on occupant's comfort, energy use and envelope' durability. This four years (2004-2008) project gathered researchers from 39 institutions from 19 countries all over the world. An important part of this project was devoted to HAM modelling of whole buildings. Six common exercises were conducted, giving elements of validation of simulation tools. Moreover modelling work had been conducted at different levels: from simplified global models, through multi-zone approaches to CFD coupled with HAM transfers in envelope elements. This paper will illustrate some of the modelling work that has taken place.

KEYWORDS : coupled transfers, Heat-Ai-Moisture, International Energy Agency

1. INTRODUCTION

La chaleur et la vapeur d'eau générées par l'utilisation de bâtiment, les flux de chaleur, d'air et de la vapeur d'eau traversant l'enveloppe, ainsi que les flux injectés par le système de conditionnement d'air sont en équilibre permanent. Les transferts aérauliques influencent la réponse thermo-hygrique de l'enveloppe. L'humidité résultante dans l'enveloppe affecte négativement les consommations d'énergie et la durabilité de l'enveloppe. Tandis que le système de régulation de conditionnement d'air corrige sans interruption la chaleur injectée pour maintenir la température intérieure au niveau de confort, il laisse en général l'humidité relative évoluer librement, car on la considère comme moins importante que la température. Les recherches ont cependant prouvé que l'humidité relative affecte le confort

thermique et respiratoire. Elle influence aussi la perception de la qualité d'air intérieur et l'énergie consommée pour conditionner l'air. L'humidité relative élevée favorise également le développement des acariens et des moisissures.

L'Annexe 41 (MOIST-ENG) de l'Agence Internationale de l'Energie (programme ESBCS) s'est intéressée aux transferts couplés thermo-hygro-aérauliques dans les bâtiments. L'objectif était d'une part d'améliorer les connaissances scientifiques et d'autre part d'analyser les effets de la réponse couplée thermo-hygro-aéraulique des bâtiments sur le confort des occupants, les consommations énergétiques et la durabilité de l'enveloppe. Ce projet, démarré en 2004, a rassemblé les scientifiques de 39 institutions et universités, situées dans 19 pays à travers le monde. Le projet vient de se terminer lors du séminaire de clôture organisé à Lyngby (Danemark) en juin 2008.

Le travail dans l'Annexe 41 a été structuré en quatre sous-tâches suivantes : (1) Modélisation et exercices de comparaison ; (2) Investigations expérimentales ; (3) Conditions aux limites et (4) Applications.

Le présent article tente de donner un aperçu de principaux résultats concernant l'activité « Modélisation et Exercices de Comparaison ».

2. « MODELISATION ET EXERCICES DE COMPARAISON » DE L'ANNEXE 41

L'activité « Modélisation et Exercices de Comparaison » a encouragé le développement des connaissances scientifiques et des modèles numériques concernant les transferts couplés thermo-hygro-aérauliques dans les bâtiments. Ceci s'est traduit par l'amélioration de codes existants, le développement de nouveaux modèles, et la validation des modèles par comparaison entre eux et par confrontation avec des résultats expérimentaux lors des exercices de comparaison. Cette activité a rassemblé la majorité des institutions participant à l'Annexe. Il faut souligner ici que le développement d'un outil de simulation commun n'a jamais été envisagé dans ce projet.

Afin d'organiser au mieux le fonctionnement pratique, la sous-tache 1 a été divisée en deux activités principales :

- les exercices de comparaison (les benchmarks), ainsi que les études associées, présentant notamment les études de sensibilité et les développements les plus récents des codes de simulation concernés, encouragés par les exercices,
- les travaux originaux de modélisation (« free papers ») - présentations des avancements les plus récents de la recherche sur le sujet, ne relevant pas directement de l'activité précédente.

3. DIFFERENTS NIVEAUX DE « GRANULARITE » DE LA MODELISATION THERMO-HYGRO-AERAULIQUE

Les travaux de modélisation développés dans le cadre de l'Annexe balayent un large spectre de « granularité » de modèles. Par « granularité » nous entendons ici uniquement le découpage spatial, et non la complexité physique ou numérique du modèle. Quatre principaux niveaux de granularité sont présentés dans le tableau a.

Approche	Zone d'air	Enveloppe
Simplifié	Mono-zone (bâtiment = 1 zone)	Modèles type « fonction de transfert »
Intermédiaire	Multi-zone (1 pièce = 1 zone)	Modélisation 1D
Fine	Zonal (1 pièce = plusieurs zones)	Modélisation 2D
Très fine	CFD (1 pièce = milliers / millions de zones)	Modélisation 3D

Tableau a : Granularités typiques utilisées pour la modélisation thermo-hygro-aéroulque des bâtiments.

Il est intéressant de noter que dans un outil de simulation les granularités utilisées pour la zone d'air et pour l'enveloppe ne correspondent pas forcément. Le tableau b donne les associations les plus utilisées.

Air	Enveloppe			
	Simplifié	Intermédiaire	Fine	Très fine
Simplifié	X	X		X
Intermédiaire	X	X	X	X
Fine		X		
Très fine		X		X

Tableau b : Association typiques de granularités utilisées dans les codes de simulation des bâtiments.

Les granularités intermédiaires ont été les plus explorés lors des exercices de comparaison et les codes utilisés sont présentés dans les paragraphes suivants.

Concernant les modèles simplifiés, certains travaux ont concernés les représentations de « tampon hygroscopique ». Il s'agit d'un modèle de type simplifié, permettant de représenter les effets de sorption/désorption de la vapeur d'eau par les matériaux sur l'air intérieur. Dans ce cas les transferts dans l'enveloppe sont découplés : les transferts de chaleur sont représentés par des modèles simplifiés ou intermédiaires, et les transferts de vapeur d'eau sont modélisés de manière simplifiée. Les modèles simplifiés peuvent être globalement classés en modèles d'ordre 1 (par exemple modèle EC sur la figure a) ou d'ordre 2 (par exemple modèle EMPD, figure 1). Les modèles d'ordre 2 permettent en général d'avoir un résultat correct, comme l'illustre la figure a ; leur principale difficulté d'utilisation réside dans le choix correcte des paramètres.

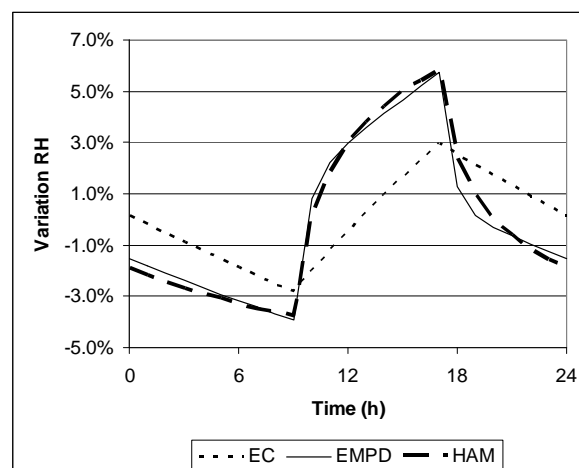


Figure 1 : Exemple de résultats de obtenus dans l'état quasi-permanent par 3 modèles : effective capacitance (EC), effective moisture penetration depth (EMPD) et modèle couplé thermo-hygro-aéroulque (HAM) (d'après Janssens and De Paepe, 2005)

Ces modèles de tampon sont implémentés dans des codes de simulation très connus (TRNSYS et EnergyPlus). L'utilisation des modélisations simplifiées permet dans certains cas d'obtenir des solutions analytiques (Bednar and Hagentoft, 2005, Hens, 2005).

Nom	site Web / référence	Diffusion	Origine	Granularité	
				Zone d'air	Enveloppe
BSim	www.bsim.dk	Code commercial	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire
BUILD OPT-VIE	Rode and Grau, 2004 www.bph.tuwien.ac.at	Restreinte	Energie	Intermédiaire	Chaleur-Humidité
Clim2000	Sofic and Bednar, 2007 Plathner and Woloszyn, 2002	Restreinte	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur-Humidité
DELPHIN 4.5	www.bauklimatik-dresden.de Grunewald, 2000	Code commercial	Enveloppe	Simplifié	Intermédiaire Chaleur, Simplifié Humidité
EnergyPlus v1.2.1	www.Energie-plus.org Crawley et al., 2004	Freeware	Energie	Intermédiaire	Fine Chaleur-Air - Humidité
ESP-r	www.esru.strath.ac.uk Koronthályová et al., 2004	Freeware	Energie	Intermédiaire	Simplifié Chaleur, Simplifié Humidité
NPI	www.ica.sk Koronthályová et al., 2006	Restreinte	Enveloppe	Simplifié	Intermédiaire Chaleur, (Humidité - utilisé coupé avec NPI)
IDA-ICE	http://www.equa.se Sahlin et al., 2004	Code commercial	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur-Air-Humidité
HAMFitPlus	Tariku, 2008	Code personnel	Couplé	Intermédiaire	Intermédiaire/Fine Chaleur-Air-Humidité
HAMLab	http://sts.bwk.tue.nl/hamlab van Schijndel, 2007	Freeware	Energie	Intermédiaire / capable de très fin	Simplifié Chaleur-Humidité, capable de fin/très fin Chaleur-Air-Humidité
HAM-Tools	www.ibpt.org Sasic Kalagasidis, 2004	Freeware	Couplé	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur-Air-Humidité
PowerDomus	www.pucpr.br/LST Mendes et al., 2003	Restreinte	Enveloppe	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur-Humidité
SPARK 2.01	http://gundog.lbl.gov/ Wurtz et al., 2006	Freeware	Energie	Intermédiaire / fine	Intermédiaire Chaleur-Humidité
TRNSYS 16.00	sel.me.wisc.edu/trnsys/ Klein et al., 2004	Code commercial	Energie	Intermédiaire	Simplifié Chaleur, Simplifié Humidité
TRNSYS ITT	www.tu-dresden.de Perschk, 2000	Restreinte	Energie	Intermédiaire	Intermédiaire Chaleur-Humidité
WUFI-Plus	www.wufi.de Holm et al, 2003	Code commercial	Enveloppe	Simplifié	Intermédiaire Chaleur-Humidité
Xam	Iwamae et al., 1999	Code personnel	Energie	Simplifié	Intermédiaire Chaleur-Humidité

Tableau c : Codes thermo-hygro-aérauliques utilisés dans l'Annexe 41 pour les simulations des bâtiments.

Plusieurs rapports ont également concernés les transferts d'air et leurs couplages avec les transferts de chaleur et vapeur d'eau. Par exemple Grau and Rode (2006) proposent des modèles simples pour prendre en compte les lames d'air ventilés dans l'enveloppe. Tout en gardant une modélisation 1D de la paroi, une couche fictive représentant la lame d'air ventilée est proposée. Aussi, des écoulements

d'air humide dans une pièce modélisés à l'aide d'une approche CFD ont été couplés avec des modèles de transferts de chaleur et de masse dans les matériaux. Différentes approches ont été proposées : modélisation de la paroi comme un fluide immobile (Hedegaard et al, 2004) ou bien programmation des équations de diffusion de vapeur dans un code CFD (Steeman et al, 2005a et 2005b).

4. CODES DE SIMULATION THERMO-HYGRO-AÉRAULIQUE DE BÂTIMENTS

17 outils de simulation du comportement thermique et/ou aéraulique, intégrant un bilan hygrique complet, ont été utilisés dans les différents exercices de comparaison de l'Annexe (cf. tableau c). Malgré la diversité de modèles implémentés, le bilan hygrique dans chaque code inclut les sources de vapeur d'eau, le transport par les mouvements de l'air et les échanges entre l'air et les parois. Certains de ces codes de simulation sont largement connus (TRNSYS, EnergyPlus, ESP-r...). Notons que le tableau c n'est pas une liste exhaustive des outils existants à travers le monde. Néanmoins il reflète les capacités de simulation actuelles. Ces codes représentent aussi les quatre principaux moyens pour aboutir à des simulations thermo-hygro-aérauliques couplés des bâtiments :

- amélioration des codes du comportement énergétique des bâtiments (11 outils),
- extension au bâtiment et aux systèmes des codes couplés représentant les éléments de l'enveloppe (4 outils),
- développement direct des outils de simulation couplés (2 codes),
- couplage entre deux codes existants (1 réalisation).

5. BENCHMARKS DE MODELISATION

Les six « exercices de comparaison » ont rassemblé jusqu'à 13 participants. Il s'agit de différents benchmarks (dont deux basés sur des résultats expérimentaux) servant à tester les capacités des outils de simulation. Ils sont solidement documentés, et peuvent constituer une base de validation de codes de simulation thermo-hygro-aérauliques dans le futur :

- CE0 (coordination CETHIL, France, 2004). Validation des aspects thermiques des modèles utilisés. Ceci a été fait en répétant quelques cas sélectionnés parmi les BESTEST de simulation énergétique de bâtiment (AIE SHC Tache 12 et ECBCS Annexe 21).
- CE1 (coordination DTU, Danemark, 2004-2005). Élargissement de CE0 et de BESTEST en ajoutant des interactions hygriques entre l'enveloppe et l'ambiance intérieure. Différents niveaux de modélisation ont été testés, dans le cas de base une solution analytique a été trouvée.
- CE2 (coordination Université de Tohoku, Japon, 2006-2007), basé sur des données expérimentales d'une cellule climatique en conditions gardées au Japon. L'impact de débit de ventilation et de surface hygroscopique sur la température et l'humidité de l'air intérieur a été étudié.
- CE3 (coordination FhG, Allemagne, 2005-2007). Cet exercice a été basé sur un double essai de chambre climatique soumise au climat extérieur, effectué par le Fraunhofer Institut für Bauphysik (FhG). Ici l'impact du climat extérieur, mais aussi des surfaces hygroscopiques sur l'humidité de l'air intérieur et sur les consommations énergétiques a été étudié.

- CE4 (coordination CETHIL, France, 2006-2007) une prolongation de CE3. L'exercice a été basé sur les cellules expérimentales de CE3. L'intention de cet exercice était de prouver qu'une gestion appropriée de l'humidité (utilisant une ventilation hygro-réglable et des matériaux hygroscopiques) conduit à la réduction de la consommation énergétique du bâtiment et à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

- CE5 (coordination KUL, Belgique, 2004-2007). Cet exercice est basé sur un cas réel de maison de ville en Belgique, présentant des problèmes liés à l'humidité et aux exfiltrations. Dans ce cas l'impact des mouvements de l'air sur le comportement thermo-hygrique a été mis en évidence.

Un benchmark expérimental supplémentaire a été proposé fin 2007. Il s'agit des mesures effectuées dans une cellule climatique à deux niveaux située à l'Université de Concordia (Montréal, Canada). Les mesures étaient disponibles trop tard pour effectuer les simulations numériques, néanmoins le cas est bien documenté et est décrit dans les rapports de l'Annexe.

La figure 2 montre un exemple de résultats obtenus. Il faut souligner que les résultats numériques ont été obtenus à « l'aveugle », c'est-à-dire uniquement à partir de conditions aux limites expérimentales, sans connaître les résultats. Ainsi, une bonne performance de l'ensemble des outils de simulations peut être constatée. Les écarts sont plus importants en cas de présence de matériaux hygroscopiques (figure du bas), résultant principalement de l'utilisation des modèles simplifiés de tampon hygroscopique sans procéder à un ajustement de paramètres.

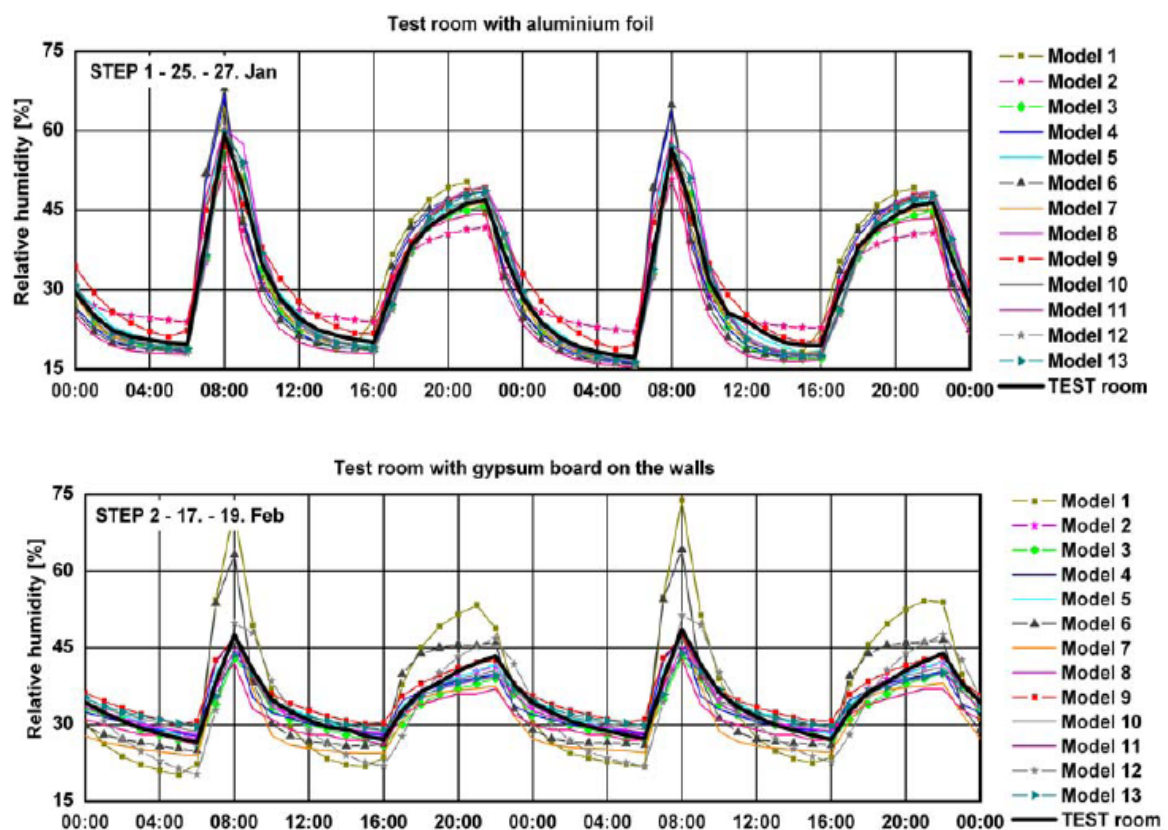


Figure 2 : Exemple de résultats obtenus lors du CE3. Humidité intérieure dans une des cellules sans matériaux hygroscopiques (graphique du haut) et avec matériau hygroscopique (graphique du bas) (d'après Holm and Lengsfeld, 2007)

6. PARTICIPATION FRANÇAISE

Les travaux proposés dans l'annexe 41 ont suscité beaucoup d'intérêt parmi différents acteurs français du domaine. La délégation, soutenue par l'ADEME, a été composée du CETHIL (Lyon), LEPTAB (La Rochelle) et CSTB (Grenoble), CENERG (Paris) intervenant en tant qu'observateur. Dans l'activité « modélisation » notre délégation a participé très activement aux différents exercices de simulation et a aussi présenté les avancées récentes de la recherche dans le cadre des « free papers ».

7. CONCLUSION

L'activité « Modélisation et Exercices de Comparaison » de l'annexe 41 a encouragé le développement des connaissances scientifiques et des modèles numériques concernant les transferts couplés thermo-hygro-aérauliques dans les bâtiments. Les sept benchmarks solidement documentés constituent une base de validation des codes de simulation thermo-hygro-aérauliques dans le futur. 17 outils de simulation du comportement thermique et/ou aéraulique, intégrant un bilan hygrique complet, ont été passés en revue lors des exercices de comparaison, pour évaluer leur adéquation aux simulations thermo-hygro-aérauliques couplées. Malgré la diversité des modèles (différents potentiels pour le transfert de masse, différents degrés de simplification), des solutions correctes ont été obtenus dans la majorité des cas courants, en termes de l'énergie globale et de l'humidité relative moyenne.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les participants de l'Annexe 41 pour leurs contributions scientifiques, ainsi que l'ADEME pour son soutien financier.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Bednar, T, Hagentoft C-E. (2005). Analytical solution for moisture buffering effect. Validation exercises for simulation tools. *Nordic Symposium on Building Physics*. Reykjavik (Iceland).
- Crawley D.B., L. K. Lawrie, C. O. Pedersen, F.C. Winkelmann. (2004). EnergyPlus: An Update. In *Proc. SimBuild, Building Sustainability and Performance through Simulation*, Boulder, CO (USA)
- Grau K., Rode C. (2006). A model for air flow in ventilated cavities implemented in a program for whole-building hygrothermal simulation. *IEA Annex 41 report A41-T1-Dk-06-1*.
- Grunewald J. (2000). Documentation of the Numerical Simulation Program DIM3.1, Volume 1: Theoretical Fundamentals. Delphin4 program installation available on the ftp-server of the Institute of Building Climatology: <http://bauklimatik-dresden.de/software.html>
- Hedegaard, L., M. Woloszyn and G. Rusaouen. (2004). Moisture interactions between air and constructions modelled with CFD. *IEA Annex 41 report A41-T1-DK-04-4*.
- Hens, H. (2005). Impact of hygric inertia on indoor climate: simple models. *IEA Annex 41 report A41-T1-B-05*.
- Holm. A., Künzel H.M., Sedlbauer, K. (2003). The Hygrothermal Behaviour of Rooms: Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation. *Proc. of the Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, Netherlands.
- Holm A, Lengsfeld K (2007). Moisture-Buffering Effect—Experimental Investigations and Validation. *Proceedings Buildings X Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*, Clearwater Beach, FL.

- Iwamae, A., H. Hanibuchi, T. Chikada. (1999). A Windows-based PC-software to design thermal environment in residential houses, Proc. of *Building Simulation'99*, Volume 3: 1325-1330.
- Janssens, A. and M. De Paepe. (2005). Effect of moisture inertia models on the predicted indoor humidity in a room. In: *Proceedings of the 26th AIVC-Conference 'Ventilation in Relation to the Energy Performance of Buildings'*, Brussels, ISBN 2-9600355-8-5, INIVE EEIG.
- Klein, S.A., Beckman, W.A., Mitchell, J.W. et al. (2004). TRNSYS 16 – A TRAnSient System Simulation program, User manual. Solar Energy Laboratory. Madison: University of Wisconsin-Madison, USA.
- Koronthalyova O., P. Mihalka, P. Matiasovsky. (2004). Model for Whole HAM-Transfer Simulation in Room. *IEA Annex 41 report A41-T1-SI-04-1*.
- Koronthályová, O. Mihálka, P. (2006). Calculation of heating energy consumption and resultant indoor climate in 1-zone object by integrated simulation model. In: *Budovy a prostredie*, ISBN 80-227-2518-8, STU, Bratislava, pp. 79-82
- Mendes, N., Oliveira, R.C.L.F. and Santos, G.H. dos. (2003). Domus 2.0: A Whole-Building Hygrothermal Simulation Program. *Proc. of the Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, Netherlands.
- Perschke, A. (2000). Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden. Dissertation TU Dresden (Germany).
- Plathner, P. and M. Woloszyn. (2002). Interzonal air and moisture transport in a test house. Experiment and modelling. *Buildings and Environment*, vol. 37/2, 189-199.
- Rode, C. and K. Grau. (2004). Whole Building Hygrothermal Simulation Model. In: *ASHRAE Transactions*, 109 (1). pp. 572-582.
- Sahlin P., L. Eriksson, P. Grozman, H. Johnsson, A. Shapovalov and M. Vuolle (2004) Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers. *Building and Environment*. Volume 39, Issue 8, Pages 949-958.
- Sasic Kalagasidis A. (2004). HAM-Tools. An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden
- Sofic M, Bednar T. (2007). Analyses of the accuracy of monthly energy balances for assessment of cooling energy demand (Analyse Der Genauigkeit Des Monatsbilanzverfahrens Zur Ermittlung Des Kühlbedarfs Von Nichtwohngebäuden). *Bauphysik*, 29(3): 202 – 207. (in German).
- Steeman H.J., A. Janssens, M. De Paepe. (2005a). How accurate are traditional models for air moisture transport in rooms: a comparison of CFD and lumped models. *IEA Annex 41 report A41-T1-B-05-3*.
- Steeman H.J., Janssens A, De Paepe M. (2005b). CFD modelling of HAM transport in buildings: The importance of local indoor climate. *IEA Annex 41 report A41-T1-B-05-8*.
- Tariku, F. (2008). PhD Thesis in Progress. University of Concordia, Canada
- Schijndel, A.W.M. van. (2007a). Integrated Heat Air & Moisture Modeling and Simulation, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, ISBN 978-90-6814-604-2
- Wurtz E., F. Haghghat, L. Mora, K.C. Mendonca, C. Maalouf, H.Zhao, P. Bourdoukan. (2006). An integrated zonal model to predict transient indoor humidity distribution, *ASHRAE Transactions* (112)2: 175-186.
- Woloszyn M, Rode C. (2008). Annex 41, Subtask 1: Modelling Principles and Common Exercises. Final Report for the Energy Conservation in Buildings and Community Systems executive committee of the International Energy Agency.