HAL
open science

D'un code de simulation thermique du bâtiment à l'observation d'état : présentation de deux applications

Harry Boyer, Philippe Lauret, Anis Younès, Alain Bastide, Frédéric Miranville

To cite this version:

Harry Boyer, Philippe Lauret, Anis Younès, Alain Bastide, Frédéric Miranville. D'un code de simulation thermique du bâtiment à l'observation d'état : présentation de deux applications. Vième colloque inter-universitaire Franco-Québecquois, CIFQ, May 2001, Lyon, France. pp.120-128. hal-00768009

HAL Id: hal-00768009

https://hal.science/hal-00768009

Submitted on 20 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

D'un code de simulation thermique du bâtiment à l'observation d'état : présentation de deux applications

Harry BOYER, Philippe LAURET, Anis YOUNES, Alain BASTIDE, Frédéric MIRANVILLE

Université de La Réunion
Faculté des Sciences et Technologies, Laboratoire de Génie Industriel
Equipe Génie Civil-Thermique de l'Habitat
15 avenue René Cassin
97 705 Saint Denis Cedex
Ile de La Réunion – France
E mail : harry.boyer@univ-reunion.fr

Résumé. Cet article traite de la possibilité d'effectuer une simulation à l'aide d'un code de simulation en contraignant le modèle par les mesures de certaines températures. L'automatique des systèmes d'état fournit un cadre théorique à la démarche d'estimation de variables internes à un système, ce à des fins de régulation. Le code de calcul peut alors être considéré comme un observateur d'état. Après une présentation rapide de l'incidence de la démarche au niveau du code de calcul et de l'interface, deux applications sont présentées, l'une visant à la vérification de la cohérence de la démarche, l'autre l'appliquant dans la cadre de la validation d'un support expérimental de laboratoire.

Mots clés. validation, modèle, thermique des bâtiments, observation d'état

1. Introduction

La confrontation des résultats de simulation à ceux de l'expérimentation (ou *validation expérimentale*) est une étape indispensable pour augmenter la fiabilité d'un code de calculs. Lors de cette étape, une difficulté importante est liée à la quantité d'information disponible, tant vis à vis des sorties du modèle (dans le cas de codes détaillés) que de l'instrumentation (multiplicité du nombre et du type de capteurs). Plusieurs laboratoires se sont intéressés à ce problème en particulier en ce qui concerne l'amélioration du modèle (lorsque ce lui-ci est mis en défaut). Ainsi, plusieurs outils d'aide à la comparaison mesure\ modèle ont été proposés aussi bien dans le domaine temporel que spectral. Notre laboratoire, impliqué dans ce domaine depuis quelques années, fait appel à l'utilisation de l'analyse temps-fréquence et de l'analyse de sensibilité paramétrique. L'un des inconvénients de l'analyse de sensibilité paramétrique, en tout cas en ce qui concerne la méthode que nous utilisons, est le nombre de simulations requis.

L'idée maîtresse de ce papier, est assez simple et provient de notre expérience de la validation expérimentale de *CODYRUN* [1-3], code thermo-aéraulique de simulation de bâtiments multizones. En effet, si le modèle est en défaut vis à vis de l'expérience, nous pensons qu'une approche pourrait consister à injecter dans le modèle global la mesure associée à la sortie du sous modèle supposé à l'origine de l'erreur. Bien entendu, cela est réalisable si cette mesure est disponible.

2. Rappels sur l'observation d'état

L'automatique fournit un cadre théorique à la démarche d'estimation de variables internes à un système, ce à des fins de régulation. Dans tout système régulé, il existe une grandeur que l'on souhaite contraindre (réguler), et à cet effet, le système de contrôle *regarde* les valeurs prises par cette sortie pour déterminer quel comportement (ou loi de commande) adopter pour satisfaire l'objectif voulu.

L'opération consistant à « regarder » les sorties est celle de l'observation du système et cette notion se généralise des sorties aux états (ou variables internes) du système. Il est possible de montrer que toute commande d'un système en boucle fermée (c'est à dire avec prise en compte de l'état de la sortie, constituant le schéma le plus courant) se ramène à un retour d'état, c'est à dire en une équation de commande (l'équation permettant de déterminer la commande afin de répondre à l'objectif donné) qui fait intervenir l'état.

Ainsi, dans une pièce climatisée, le système constitué d'un système et de l'enveloppe possède une consigne en température, une sortie (la température sèche de l'air de la pièce) et une commande assimilable à la puissance injectée par le système. La régulation la plus courante tient compte seulement de la température de l'air de la pièce (c'est la variable observée). Une régulation qui tiendrait compte d'autres variables (les températures de surface des parois, par exemple) serait plus performante, car l'information à la disposition du système de régulation serait alors plus riche. Pourquoi ? Imaginons que dans notre pièce le rayonnement direct soit à un moment incident sur le plancher et l'échauffe considérablement. La régulation classique qui ne *voit* que la température sèche va attendre que l'échauffement du plancher se répercute sur l'air pour réagir en conséquence et actionner la production de froid. Anticiper l'effet des perturbations est reconnu comme étant plus performant car plus stable, plus rapide et moins consommateur d'énergie. Ainsi, un système de climatisation qui disposerait de l'information température de surface du plancher serait donc meilleur que celui ne tenant compte que de la température d'air. Techniquement, ceci n'est pas très pratique. Faut t-il pour autant abandonner l'idée ? Pas tout à fait, car si la mesure n'est pas faisable, une estimation en est cependant envisageable. En effet, pour notre système enveloppe, il est possible de construire des modèles. La donnée des grandeurs météorologiques (comme sollicitations du modèle) permet ainsi d'en obtenir une première estimation (de cette grandeur température de plancher, mais aussi des autres températures, dont celle de l'air). Cette dernière étant toujours mesurée, il est dommage de la recalculer car son estimation est moins précise que la mesure (non prise en compte de la stratification, ...). Un meilleur modèle d'estimation de la température de plancher est alors un modèle dans lequel cette température d'air serait une entrée. C'est un observateur. Il s'agit donc de modèles qui admettent en entrée les sollicitations et certaines mesures, pour reconstituer d'autres données. Si ces données servent à la commande d'un système, le modèle ainsi formé s'appelle un observateur d'état. Plus généralement, ce modèle permet d'obtenir l'estimation de grandeurs sur un système, au départ d'autres grandeurs mesurées. Il porte alors le aussi nom de capteur logiciel [4], d'autres exemples d'application étant proposés dans [5-6]. Les aspects mathématiques associés à l'observabilité du système ainsi constitué n'ont pas été abordés dans ce papier, mais vérifiés par ailleurs.

La démarche qui consiste au sein d'un modèle à incorporer des mesures n'est donc pas nouvelle et possède un fondement tout à fait rigoureux.

3. La prise en compte de mesures dans CODYRUN

3.1. Au niveau du code de calcul

Ainsi, dans la démarche de validation, notre premier objectif a été de permettre au code d'intégrer des séries temporelles de mesures pour certains éléments (lorsque celles-ci sont disponibles). Ces températures imposées (mais variables dans le temps) interviennent dans le modèle comme des conditions aux limites et ne sont ainsi pas calculées. Ces informations (il est possible d'intégrer les séries de températures mesurées de plusieurs éléments) sont propagées dans le modèle (de par les couplages entres différents nœuds de discrétisation). Ainsi, par rapport à un modèle global non valide, un premier niveau d'exploitation sera d'identifier un à un les sous-modèles défectueux, en injectant dans le modèle global les mesures associées à ce sous modèle et en ré-analysant les écarts alors obtenus entre modèle-mesure. Une amélioration est proposée dans un autre article de ce colloque par *Lauret & al*.

Dans chaque zone, *CODYRUN* établit un système d'équations du type équation matricielle du premier ordre, qui se ramène après différences finies à la résolution d'un système linéaire dont les inconnues sont les températures. Chacune des équations est une équation de bilan thermique d'un nœud, faisant intervenir les modèles des phénomènes de transfert et par là-même les couplages avec d'autres nœuds. Imposer à un pas de temps donné une température ne consiste qu'à remplacer dans le système précédent la ligne correspondante par celle traduisant l'égalité de la température du nœud *forcé* à la valeur lue dans le fichier. Sur le système bâtiment considéré, une condition aux limites de type Dirichlet est appliquée sur l'une de ses frontières.

3.2. Au niveau de l'interface

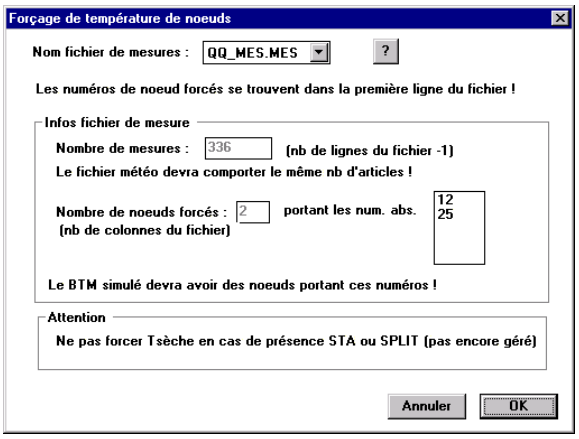

Figure 1 : Fenêtre de CODYRUN

Lors d'une simulation, au travers de la fenêtre ci-contre, il est possible de mettre en place le forçage. Il permet de choisir le fichier des mesures, lesquelles doivent être en même nombre que le nombre d'articles du fichier météo. Dans ce fichier en mode texte, une ligne de titre donne simplement en tête de chaque colonne le numéro absolu du ou des nœuds concernés.

4. Applications du code de calcul en présence de contraintes

4.1. La thermique du mur

L'illustration proposée est celui d'une paroi pour laquelle on souhaite connaître la répartition des températures intérieures (en vue de problèmes de condensation dans une lame d'air, température d'interface entre deux matériaux, …). Compte tenu des sollicitations et des

conditions intérieures, un code de simulation utilisé classiquement permet d'apporter des éléments de réponse au problème posé. Cependant, la répartition des températures internes à la paroi se trouve être tributaire du modèle des autres variables calculées et en particulier à celui des températures de surface (conditionnées par les modèles des échanges superficiels). Il est à priori plus intéressant d'écrire un modèle dédié, admettant en entrée les températures de surface pour une meilleure estimation. Ce modèle présente alors à l'évidence une meilleure incertitude que le précédent, car il n'est tributaire que du modèle conductif. Ainsi, par rapport au problème posé, intégrer les températures de surface comme entrée du modèle permet de rapprocher du modèle de paroi la réalité physique (les conditions aux limites sous forme des mesures effectuées). Une autre possibilité est d'insérer le modèle de cette paroi dans un bâtiment et d'utiliser le forçage des températures de surface pour que *CODYRUN* devienne ce modèle. Il est à noter que dans la paroi considérée, comme il est possible de choisir un nombre de nœuds différents [2], le capteur logiciel ainsi réalisé hérite du caractère multi-modèle.

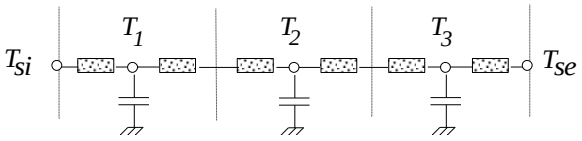

Figure 2 : Modèle analogique de paroi

Le cas présenté sur la figure suivante est celui de la répartition des températures obtenues dans la paroi considérée (au sein de la quelle la conduction est modélisée analogiquement à l'aide d'un modèle à 3 nœuds par couche, fig. 2) en régime permanent avec *CODYRUN* lorsque sont imposées les températures de surface (19 °C à l'intérieur, 0°C à l'extérieur pour une paroi enduit 2cm + isolant 10 cm+ béton 20 cm).

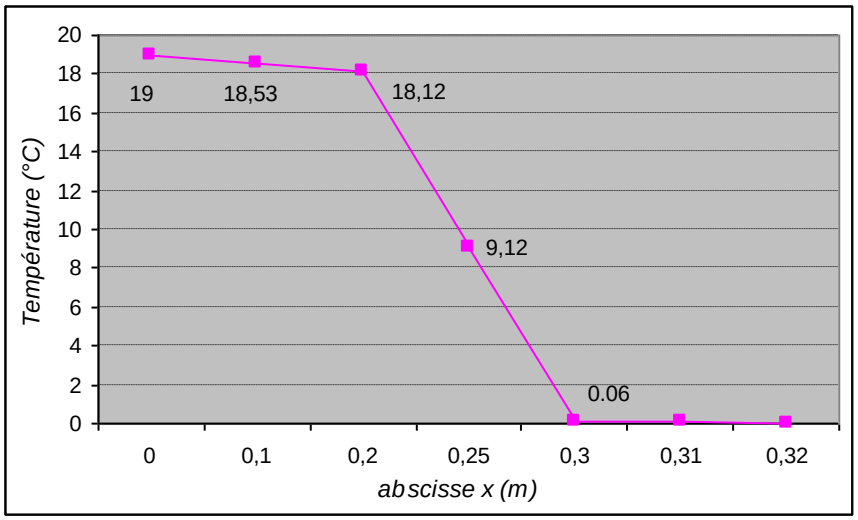

Figure 3 : Profil de température obtenu

L'observateur de la paroi réalisée retrouve à l'évidence la solution analytique bien connue. A défaut d'une validation de la démarche (des éléments de celle de *CODYRUN* sont disponibles, par ex. [3], [7-9]), une cohérence manifeste des résultats peut être observée sur le cas observé ainsi que sur d'autres non illustrés dans ce papier (régime dynamique, ressaut de température de surface).

4.2. Contribution à la validation d'un modèle d'enveloppe

La cellule LGI est un bâtiment de forme géométrique simple (cubique) et modulable (figure 2) qui a été réalisée dans le cadre de la validation expérimentale de *CODYRUN* par Garde [10]. Le bâti sur lequel sont fixées les parois, est en structure métallique. Les parois verticales sont composées d'une couche de polyuréthanne prise en sandwich entre deux couches de 5mm de fibrociment. Afin de minimiser les ponts thermiques, le contact entre deux parois est établi par l'intermédiaire d'un matériau isolant (mousse de polyuréthanne). Le plancher, composé de dalles en béton, est découplé thermiquement du sol grâce à du polystyrène. La cellule dispose, de plus, d'un vitrage et d'une porte.

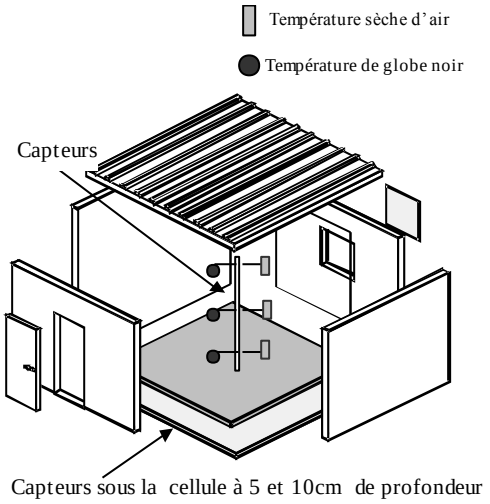

Figure 4 : Instrumentation de la cellule.

La cellule se trouve sur une dalle en béton dans laquelle ont été placés des thermocouples à 10 et 5 cm de profondeur. Le pas de temps de mesure a été fixé à ¼ h et l'albédo a été estimé à 0.3. Une station météorologique, sur le site, mesure les sollicitations extérieures du bâtiment. Les mesures sont relevées toutes les minutes (toutes les 10 secondes pour la météo) et moyennées tous les quarts d'heure. Dans le cadre d'applications de l'analyse de sensibilité à la validation expérimentale, Mara [11] a également travaillé sur cette même cellule expérimentale. Une première étape dite de *calibration* de modèle, réalisée sur des données expérimentales de 1996 [10], a permis aux auteurs d'obtenir un modèle supposé optimal (valeur des caractéristiques thermo-physiques associées aux matériaux, absorptivité des parois, …). Les caractéristiques statistiques du résidu sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Moyenne	*Ecart type*
0.028 °C	0.256 °C

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques du résidu obtenu avec le modèle optimisé

Les prédictions s'avèrent acceptables et la précision des résultats est comparable (sauf en ce qui concerne la moyenne) à celle des capteurs utilisés (thermocouples). Cependant, afin de s'assurer que ce dernier modèle est *valide*, une étape dite de *corroboration* a été menée. Celle ci consiste à vérifier que le modèle donne des résultats aussi satisfaisants sur une séquence de mesures différente (la cellule a entre temps été déplacée sur un autre site expérimental). Une nouvelle campagne de mesures a été réalisée en Mars 2000.

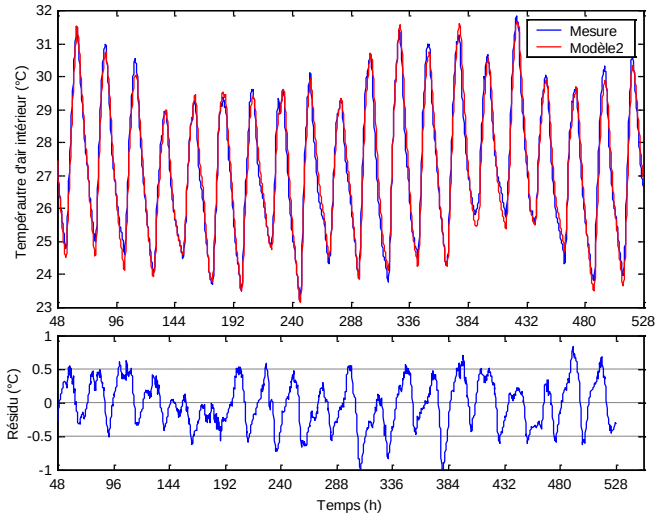

Figure 5 : Comparaison des températures d'air intérieur mesurée et simulée

Moyenne	*Ecart type*
0.232 °C	0.377 °C

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques du résidu, séquence de mesures de Mars 2000.

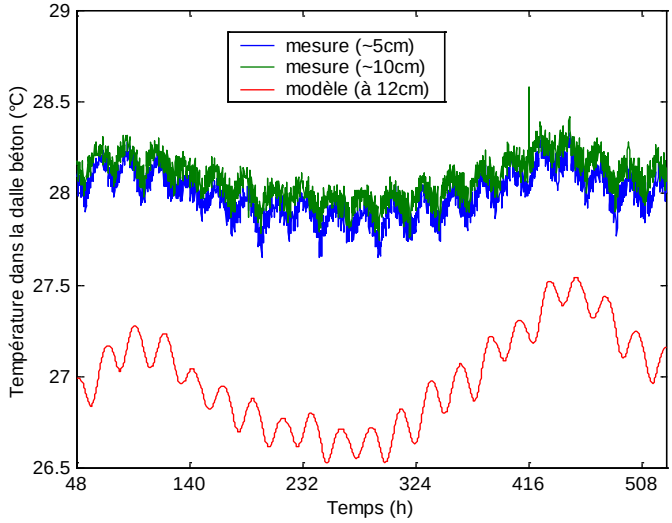

Figure 6 : Températures mesurées sous la dalle

En ce qui concerne la validité du modèle de la cellule LGI, l'auteur s'est interrogé sur l'origine de la dégradation manifeste de la moyenne du résidu et en particulier de son évolution régulière (composante journalière difficilement explicable par du bruit de mesure). Guidés par la connaissance des conditions expérimentales, nous avons comparé la température mesurée à 10 cm dans la dalle en béton sous la cellule à celle prédite par le modèle. Cette comparaison a mis en exergue une tendance identique (presque stationnaire) mais avec un décalage compris entre 0.5 et 1°C.

Afin de tester si l'origine des écarts obtenus sur la température sèche d'air intérieur provient de la mauvaise prise en compte de l'effet du sol, un second modèle a été considéré pour lequel la température à 10 cm sous la dalle béton est égale à celle mesurée, en exploitant alors cette possibilité offerte par *CODYRUN*. Cette nouvelle prise en compte de l'effet du sol transforme la condition de flux nul jusqu'alors utilisée, en une condition de type Dirichlet. Les résultats obtenus ont été les suivants :

Moyenne	*Ecart type*
-0.012 °C	0.340 °C

Tableau 3 : Caractéristiques statistiques du nouveau résidu

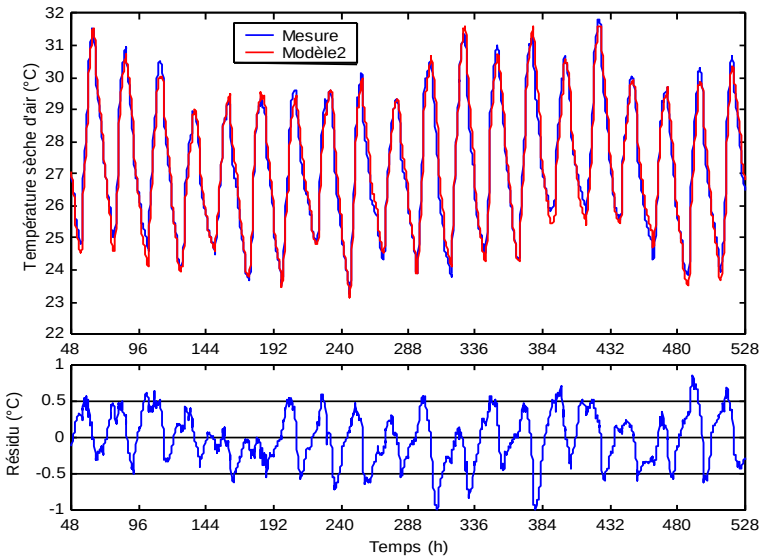

Figure 7 : Comparaison des températures d'air intérieur mesurée et simulée

La prise en compte de l'effet du sol ne permet que d'améliorer la moyenne du résidu, la composante journalière étant toujours présente. Dans le principe, la possibilité d'imposer au sein du code la température en sous face de la dalle et de constater l'amélioration du modèle de la cellule a permis d'identifier le module terre-plein comme étant susceptible d'améliorations importantes.

5. Conclusion

Lorsque qu'un modèle global est en défaut parce qu'un sous-modèle est localement défectueux, nous avons illustré l'intérêt d'être en mesure d'injecter dans le modèle global la mesure associée à la sortie de sous-modèle. La thermique de bâtiments s'intéressant à des modèles de plus en plus complexes, un autre intérêt de la démarche se rencontre dans le cas de la validation des modèles de sous-systèmes (système de traitement d'air, toitures complexes, …). Un autre exemple d'application exploitant cette démarche est celui d'une aide à validation (voir autre article de ce congrès, *Lauret & al*). Cette possibilité d'imposer certaines variables à leur mesure permet de rapprocher du modèle du sous système étudié les conditions aux limites et de se focaliser très localement sur la question de la qualité de la

modélisation effectuée. Enfin, ainsi qu'évoqué dans la partie relative au rappel sur les observateurs d'état, bon nombre de perspectives s'offrent dans le domaine de la mise en œuvre de régulations performantes de systèmes [12] de systèmes de traitement d'air.

6. Références

[1] H. Boyer, J.P. Chabriat, B. Grondin-Perez, C. Tourrand, J. Brau. Thermal building simulation and computer generation of nodal models, Building and Environment, 31 (3), 1996, pp. 207-214.

[2] H. Boyer, F. Garde, J.C. Gatina, J. Brau, A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes, Energy and Buildings, 28 (1998), 1, pp. 71-79

[3] H. Boyer, A.P. Lauret, L. Adelard, T.A. Mara, Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation, Energy and Buildings, 29 (1999), 283-292

[4] J. Oksman, Mesures et information, Pour la science, n° 258, Avril 1999, pp. 90-95

[5] L. Scott Stephens, C.R. Knospe, Determination of power losses in high speed magnetic bearings using temperature measurements, Experimental Heat Transfer, (1995) 8, pp. 33-56

[6] X. Peng, A state space model for predicting and controlling the temperatures responses of indoor air zones, Energy and Buildings, (2000)

[7] F. Lucas, T. Mara, F. Garde, H. Boyer, A comparison between CODYRUN and TRNSYS, simulation codes for thermal building behaviour, Renewable Energy, 15 (1998), Part. II, 1624-1633

[8] T. A. Mara, F. Garde H. Boyer, M. Mamode, Empirical Validation of the Thermal Model of a Passive Solar Cell test, accepté à paraître à Energy and Buildings, (2000)

[9] A.J.P. Lauret, T. A. Mara, H. Boyer, L. Adelard, F. Garde, A validation methodology aid for improving a thermal building model : case of diffuse radiation accounting in a tropical climate Accepté à paraître à Energy and Buildings, (2000)

[10] Garde, F. Validation et développement d'un modèle thermo-aéraulique de bâtiments en climatisation passive et active. Intégration multimodèle de systèmes. Thèse Sci : Université de La Réunion, 1997, 260 p.

[11] T. Mara, Contribution à la validation globale d'un logiciel de simulation thermo-aéraulique du bâtiment : Proposition de nouveaux outils d'aide à la validation. Thèse Sci. Université de La Réunion, 2000, 194 p.

[12] H. Boyer, Thermique et aéraulique des bâtiments : une contribution spécifique, sa validation et ses applications, Habilitation à Diriger les Recherches, Université de La Réunion, 1999.