



HAL
open science

DE LA SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI À L'OBSERVATION D'ETAT: L'ASSIMILATION DE DONNEES DANS CODYRUN EN VUE DE LA VERIFICATION DES PROPRIETES THERMIQUES D'UN MATERIAU

Aurélien Jean, Harry Boyer, Craig Adams, Ali Hamada Fakra, Mario Medina,
Frédéric Miranville

► **To cite this version:**

Aurélien Jean, Harry Boyer, Craig Adams, Ali Hamada Fakra, Mario Medina, et al.. DE LA SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI À L'OBSERVATION D'ETAT: L'ASSIMILATION DE DONNEES DANS CODYRUN EN VUE DE LA VERIFICATION DES PROPRIETES THERMIQUES D'UN MATERIAU. CIFEM 2014, 3ième Colloque International Franco-phonie d'Énergétique et Mécanique CIFEM, May 2014, Moroni, Comores. hal-01110499

HAL Id: hal-01110499

<https://hal.science/hal-01110499>

Submitted on 28 Jan 2015

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.

DE LA SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE PAROI À L'OBSERVATION D'ETAT: L'ASSIMILATION DE DONNEES DANS CODYRUN EN VUE DE LA VERIFICATION DES PROPRIETES THERMIQUES D'UN MATERIAU

Aurélien P. JEAN ^{a,*}, Harry BOYER ^a, Craig ADAMS ^b,
Ali H. FAKRA ^a, Mario A. MEDINA ^b, Frédéric MIRANVILLE ^a

^a Laboratoire PIMENT, Pôle PhyBât, Université de La Réunion, France

^b CEAE, The University of Kansas, Lawrence, KS, USA

RÉSUMÉ

Cet article traite de la possibilité d'utiliser un code de calcul spécialisé en thermique du bâtiment (CODYRUN) comme capteur logiciel, notion issue de l'observation d'état. Basée sur l'assimilation de données et la vérification expérimentale, l'approche particulière proposée permet de modéliser une paroi multicouche en vue de vérifier les propriétés thermiques (ρ , λ , et c_p) de l'un de ses constituants. Le capteur logiciel ainsi défini permet alors une vérification des propriétés thermiques en fonction des conditions d'utilisation. Après une rapide présentation de l'expérimentation menée et des données obtenues, la modélisation retenue ainsi que son implémentation sous CODYRUN sont explicitées. Enfin, le traitement des résultats obtenus en vue de la vérification des propriétés thermiques de l'échantillon testé est décrit.

Mots Clés : Vérification, Modèle, Thermique des bâtiments, Observation d'état.

NOMENCLATURE

Lettres Latines:

c_p	Capacité calorifique massique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
t	Temps	s
T_{ai}	Température d'air interne	K
T_{ae}	Température d'air externe	K
T_{cx}	Température du nœud de la couche x	K
T_{ixy}	Température du nœud i à l'interface des couches x et y	K
T_{ini}	Température initiale du système	K
$T_{p,e}$	Température de face externe de la paroi	K
$T_{p,e}^s$	Température simulée de la face externe de la paroi étudiée	K
$T_{p,i}$	Température de face interne de la paroi	K

Lettres Grecs:

λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Δ_x	Discretisation spatiale	m
η	Erreur de simulation associé à $T_{p,e}$	K
$\dot{\eta}$	Dérivée temporelle de η	$K.s^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
ϕ_e	Flux thermique entre la face externe et l'environnement	W
ϕ_{cv}^f	Flux convectif fictif	W
$\phi_{cv,e}$	Flux convectif externe	W
$\phi_{cv,i}$	Flux convectif interne	W
ϕ_p	Flux thermique produit	W
$\phi_{r,e}$	Flux radiatif externe	W
$\phi_{r,i}$	Flux radiatif interne	W
ϕ_{st}	Flux thermique stocké	W

1. INTRODUCTION

De nombreux matériaux peuvent être utilisés dans le cadre de la construction d'un bâtiment. Dans une approche énergétique du bâti, et afin de pouvoir prédire leurs comportements au sein des systèmes complexes

auxquels ils seront incorporés, il est important de connaître les caractéristiques thermiques de ceux-ci (ρ , λ , et c_p). Cette prédiction est la condition *sine qua non* de la conception d'un bâtiment écologique, c'est à dire adapté aux besoins et en accord avec l'environnement. Parmi les matériaux utilisés, certains possèdent initialement des caractéristiques thermophysiques indéterminées. Celles-ci sont alors obtenues expérimentalement. D'autres

* auteur correspondant

Adresse électronique : aurelien.jean@univ-reunion.fr

matériaux possèdent ces caractéristiques, mais elles ont été déterminées dans des conditions légèrement différentes des conditions d'utilisation. Dans ces deux cas, il est alors important de s'assurer que les caractéristiques thermo-physiques associées à chacun des matériaux sont valables dans leurs conditions réelles d'utilisation.

L'idée maîtresse de cet article repose sur la notion d'observateur d'état. Ce concept permet ici de vérifier les caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés. Pour ce faire, la paroi contenant l'échantillon à tester est instrumentée. Certaines des données expérimentales sont ensuite injectées, assimilées, dans le code de simulation dans le but de définir précisément les conditions aux limites du système. En sortie de simulation, les résultats d'une variable spécifique (la sortie de l'observateur) sont confrontés aux valeurs expérimentales, définissant ainsi la notion d'erreur (η). Dans la cas de l'automatique, cette grandeur observée permet alors la commande d'un système.

2. L'EXPERIMENTATION

Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques thermiques (ρ , λ_x^1 , et c_p) du matériau testé, il a fallu créer un environnement propice permettant cette déduction². Le principe retenu fut la conception d'une forme d'étuve, d'un four ayant les caractéristiques souhaitées (Fig. 1(a)). Dans le cadre de cet article, le matériau testé est la roche de lave. Les tests sont donc réalisés sur l'échantillon présenté figure 1(c).

La principale caractéristique du montage fut la capacité de celui-ci à recréer des conditions d'utilisation proches des conditions réelles. Pour ce faire, les parois de l'étuve (ou enceinte), constitué d'une ossature bois, contiennent les matériaux à tester. Les dimensions de l'enceinte sont proches de la réalité constructive. Ceci afin que les phénomènes physiques s'y déroulant soient caractéristiques de l'utilisation pour laquelle les conductivités sont déterminées. À cette fin, les parois sont faites de deux cloisons en bois séparées par 9 cm d'un échantillon du matériau à tester. Suite à l'analyse des données recueillies, sur plus de 50h d'expérimentations, les grandeurs associées aux propriétés thermiques de la roche de lave ont été obtenues. Pour ce faire, les propriétés du bois blanc utilisé ont été déterminées au préalable (Tab. 1).

Note : Considérant l'expérience, les valeurs obtenues et présentées pour la roche de lave (Tab. 1), sont valides uniquement sur des plages de température et d'humidité allant respectivement de 28°C à 34°C et de 53% à 67%. L'extrapolation de ces grandeurs à d'autres plages n'est pas évidente car l'influence de l'eau évolue en fonction de la température.

¹ λ_x définit la conductivité thermique dans le plan horizontal.

² L'expérience sur laquelle s'appuie cet article a été menée en juillet 2010 au département d'ingénierie de l'université du Kansas par A.P. JEAN sous la direction de M.A. MEDINA et C. ADAMS. Celle-ci s'effectuait dans le cadre d'un projet d'ingénieur sans frontière portant sur l'assainissement biologique des zones habitées en Bolivie.

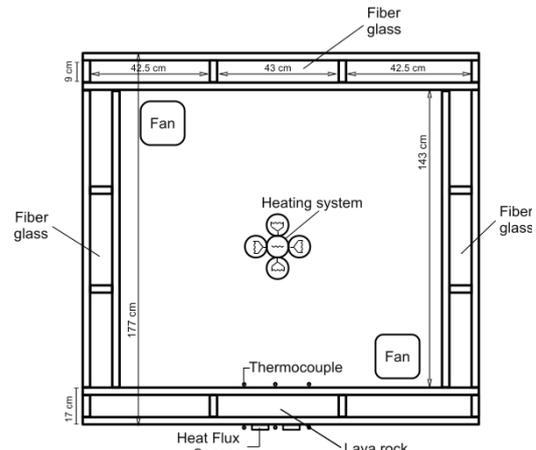


Fig. 1(a) : Schéma du montage.



Fig. 1(b) : Vue de la paroi sud, face externe.



Fig. 1(c) : La roche de lave.

Fig. 1 : Le montage expérimental.

3. PRESENTATION DE LA MODELISATION

Afin de pouvoir vérifier les caractéristiques thermiques obtenues pour l'échantillon testé, il est nécessaire de modéliser les températures de surfaces, ainsi que le flux thermique présent à travers la paroi où celui-ci est positionné (Fig. 2(b)). L'objectif étant de vérifier ces propriétés thermiques, les phénomènes physiques étudiés peuvent être limités à la conduction à travers la paroi. Dans cette optique, seule la conduction est modélisée. Les phénomènes physiques de convection et de rayonnement, présents en surface interne et externe de la paroi, sont alors définis par les conditions aux limites du système. Pour ce faire, l'assimilation de données (ou forçage) est utilisé.

Table 1: Densité, Conductivité thermique¹ et Capacité massique des matériaux utilisés.

Matériaux	ρ (Kg.m ⁻³)	λ_x (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	c_p (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Roche de lave	786 ± 2	1,29.10 ⁻¹ ± 3.10 ⁻³	12,52 ± 56
Pin blanc	483 ± 4	1,29.10 ⁻¹ ± 1.10 ⁻³	380 ± 7

L'assimilation de données consiste à « forcer » une température ou un flux, c'est à dire à fournir au code de calcul les valeurs souhaitées des grandeurs choisies à chacun des pas de temps. Plus exactement il s'agit de l'assimilation de données directe [1], à ne pas confondre avec l'assimilation de données variationnelle [2]. L'injection de ces données permet notamment de caler la simulation si besoin. Ainsi les valeurs de flux ou de températures ne proviennent plus d'un modèle, mais de valeurs mesurées (évoluant temporellement) ou d'une consigne (au sens de l'automatique). Dans notre cas, l'assimilation de données permet notamment d'intégrer les valeurs expérimentales de $T_{p,i}$. Celles-ci ont l'avantage d'être plus proches de la réalité physique que les valeurs obtenues initialement par la modélisation des phénomènes de transferts³ [3]. Cette approche permet donc d'obtenir une meilleure estimation du champ de température au sein de la paroi [4]. De plus, l'incertitude sur les valeurs obtenues de la sortie de l'observateur ($T_{p,e}$) est également plus faible, puisque n'étant alors tributaire que du modèle conductif.

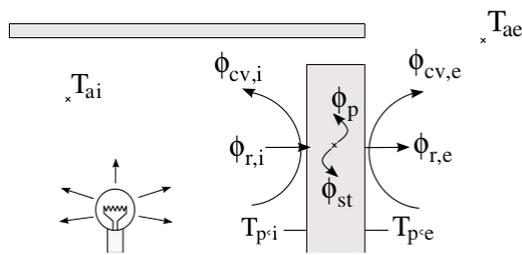


Fig. 2(a) : Les phénomènes physiques en présence.

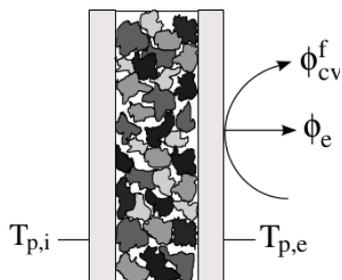


Fig. 2(b) : Les grandeurs manipulées.

Fig 2 : Les grandeurs physiques observées.

Dans l'étude proposée, l'assimilation de données est effectuée aux bornes du système modélisé. Les valeurs ainsi intégrées, constituent donc les conditions aux limites du système. Celles-ci sont de type Dirichlet et Neumann, respectivement sur les faces internes et externes de la paroi. Les grandeurs aux limites du système subissant l'assimilation de données sont alors $T_{p,i}$ et ϕ_e (Fig. 2). Les valeurs de ϕ_e correspondent aux

³ En effet, car la précision des modèles utilisés est limitée (entre autres) par des grandeurs telles que l'absorptivité des surfaces, les échanges convectifs, (etc.), dont les valeurs ne sont pas connues avec précision.

valeurs de flux relevées expérimentalement en surface externe de la paroi et celles de $T_{p,i}$ sont les températures relevées sur la face interne. À noter que $T_{p,i}$ résulte de l'interaction de la surface interne de la paroi avec son environnement, les transferts thermiques qui y sont présents sont donc pris en compte de façon indirecte.

Le but de la présente étude consiste à vérifier les propriétés thermiques (ρ , λ , et c_p) associées à l'échantillon grâce à la sortie de l'observateur ($T_{p,e}$). Pour ce faire, l'évolution de l'erreur (η) entre les valeurs expérimentales et simulées de $T_{p,e}$ est obtenue, permettant ainsi de vérifier ces propriétés sur le domaine étudié. La définition de ce domaine étant exclusivement basée sur la sortie de l'observateur ($T_{p,e}$), il est important que celui-ci ne soit pas faussé par l'assimilation de $T_{p,i}$ et ϕ_e . Le choix du type de conditions aux limites résulte de cette considération. Ils sont respectivement de type Dirichlet et Neumann, en face interne et externe, laissant $T_{p,e}$ libre d'évoluer.

À noter que le flux (ϕ_e) est injecté de façon à être découplé de $T_{p,e}$. Ainsi, bien que contrainte, $T_{p,e}$ n'est pas forcée. De plus, les contraintes que représentent $T_{p,i}$ et ϕ_e sur $T_{p,e}$ permettent, dans une approche empirique, de caler le système tout en le laissant évoluer au gré des propriétés conductives de chacune des couches composant la paroi. Dans une approche physique des phénomènes, ces « contraintes » représentent des transferts thermiques; autrement dit, l'influence du milieu sur le système. Par conséquent, les valeurs simulées de $T_{p,e}$ représentent donc bien la température de la face externe de la paroi. Elles proviennent du transfert de chaleur par conduction et sont modulées par l'influence de l'environnement.

4. L'IMPLEMENTATION SOUS CODYRUN

4.1. PRESENTATION DU CODE MULTI-MODELE

La simulation présentée dans la section précédente a été implémentée sous CODYRUN. C'est un logiciel permettant la simulation de bâtiments multizones développé par le laboratoire PIMENT (Université de la Réunion) et créé par Harry BOYER en 1993 [5] Sa conception est basée sur la modularité et une approche simplifiée des phénomènes physiques (modèles semi-détaillés). Elle permet ainsi des résultats précis pour un faible coût de calcul. Initialement spécialisé en modélisation thermo-aéroulque, divers modèles (parois minces réfléchissantes [6] [7], éclairage [8], pollution de l'air, etc.) ont été implémentés au fil des ans tout en conservant la logique initiale. D'autres sont en cours d'implémentation (panneaux photovoltaïques [9]). Les nombreuses applications dans le domaine du confort thermique et de la consommation énergétique [10] [11], font de CODYRUN un outil prédictif et de recherche appréciable [12] [13]. Ceci est d'autant plus vrai que la précision⁴ des résultats est au minimum équivalente à celle des logiciels de premier plan que sont ENERGYPLUS et RADIANCE [14]. Enfin, sa modularité nous permet en outre de l'implémenter spécifiquement afin de faire de la vérification expérimentale [5] [15].

⁴ Résultats obtenus suite aux procédures de validation des modèles implémentés, dont BESTEST.

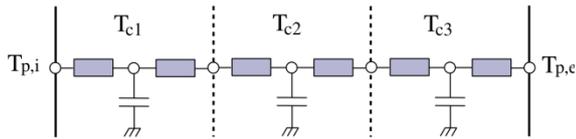


Fig. 3(a) : Modélisation analogique.

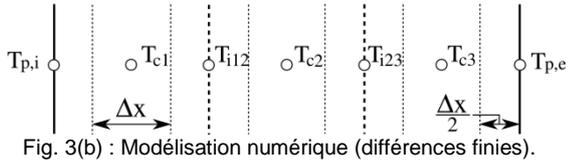


Fig. 3(b) : Modélisation numérique (différences finies).

Fig. 3 : Modélisation de la paroi multi-couches.

4.2. MODELISATION DE LA CONDUCTION

Dans le cadre de notre étude, le système modélisé est une paroi composée de trois couches (bois – roche de lave – bois) dont les conditions aux limites sont des données expérimentales assimilées. Les figures 3(a) et 3(b) explicitent les modèles analogiques et numériques associés. Le seul modèle utilisé est donc celui du transfert conductif. Sous CODYRUN, celui-ci est approché par l'implémentation de l'équation de la chaleur discrétisée par la méthode des différences finies (schéma implicite). Dans le système linéaire obtenu, les inconnues sont les températures des nœuds au pas de temps $t + 1$. Chacune de ces équations correspond à 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. Dans ce contexte, l'assimilation de données revient donc à imposer, pour un nœud donné, la valeur de la température au lieu de la calculer. Autrement dit, l'assimilation de données pour un nœud consiste uniquement à remplacer, dans le système d'équation évoqué précédemment, la ligne de calcul correspondante par la valeur souhaitée (Eq. 1).

$$T = \begin{cases} \text{Valeur lue,} & \text{Si assimilation} \\ \text{Valeur calculée,} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Enfin, il est à noter que le capteur logiciel ainsi réalisé hérite du caractère multi-modèle intrinsèque à CODYRUN. Le nombre de nœuds propre à la modélisation conductive de chacune des couches de la paroi peut en particulier être choisi [10]. Ceux-ci sont alors déterminés en fonction des besoins. Dans notre cas, trois nœuds par couche est suffisant.

4.3. IMPLEMENTATION DE L'ASSIMILATION DE DONNEES

Partant de l'équation de la chaleur, il est aisé d'ajouter d'un flux thermique au bilan. Combinant les phénomènes de convectifs et radiatifs, c'est ainsi que ϕ_e est assimilé.

L'assimilation des valeurs de $T_{p,i}$ sont permises par la méthode explicitée dans le paragraphe précédent. Concrètement, ces valeurs sont données au code par le biais d'un fichier texte, à la syntaxe particulière, contenant les valeurs de $T_{p,i}$. Graphiquement, l'assimilation des valeurs de est permise par la fenêtre présentée sur la figure 4.

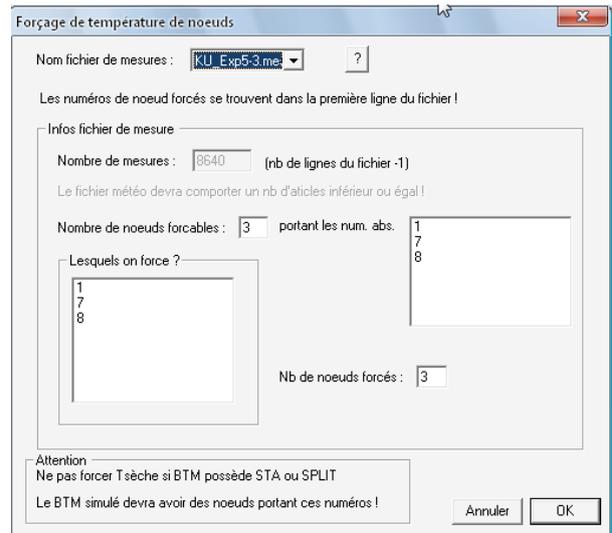


Fig. 4 : La fenêtre du forçage des températures.

Enfin, l'initialisation est effectuée par le choix de la température initiale du système. Celle-ci est prise en fonction de la première valeur expérimentale de la température de face externe de la paroi, tel que $T_{ini} = T_{p,e}$.

5. RESULTATS

Suite à la simulation dont l'implémentation est présentée dans la section précédente, les valeurs de sortie de l'observateur ($T_{p,e}^S$) ont été obtenues pour chacun des pas de temps. La figure 5 présente ces résultats.

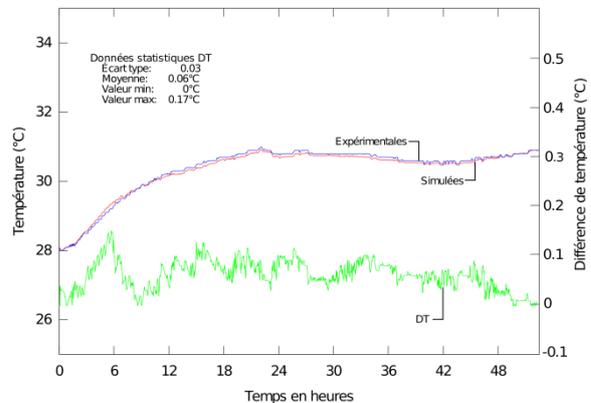


Fig. 5 : Comparaison des températures de surface expérimentales et simulées.

La notion de validité des caractéristiques thermiques utilisées pour le matériau considéré est liée à la notion d'erreur (η) entre les valeurs simulées et expérimentales de $T_{p,e}$ (Eq. 2). C'est cette notion d'erreur qui permet alors la vérification des propriétés thermiques de l'échantillon.

$$\eta = T_{p,e}^S - T_{p,e} \quad (2)$$

En effet, dans une approche se référant à l'automatique, si les erreurs obtenues sont assez faibles alors les propriétés thermiques associées à l'échantillon sont vérifiées dans les conditions de l'expérimentation. Dans le cas où $\eta(t) \neq 0$, l'évolution de l'erreur permet de définir des plages de validité en fonction de l'évolution des

conditions du système. Enfin, dans le cas d'erreurs trop importantes sur les plages souhaitées, il est alors nécessaire d'approcher le système par le biais de l'optimisation du modèle. Les grandeurs ρ , λ , et c_p sont alors itérativement modifiées en fonction des résultats des simulations successives.

Naturellement, pour connaître la validité de ceux-ci dans d'autres conditions, il est alors nécessaire de conduire l'expérience correspondante afin d'obtenir les valeurs de $T_{p,i}$ et ϕ_e associées (dans notre exemple).

Considérant les données statistiques présentées pour l'exemple proposé (Fig. 5), les erreurs maximales et moyennes sont respectivement de 0.17°C et 0.06°C. Les erreurs obtenues ici permettent alors de confirmer la validité des propriétés thermiques associées à l'échantillon dans les conditions de l'expérimentation.

6. DISCUSSION

L'objectif principal de la méthode proposée était vérifier les grandeurs obtenues à partir de données expérimentales (dans les conditions d'utilisations). Il apparaît que l'approche utilisée à cette fin permet d'atteindre cet objectif de manière assez simple. Toutefois, l'intégration de cette utilisation dans CODYRUN permettra d'accroître cette simplicité.

Il ressort donc que l'utilisation de codes de calculs comme capteurs logiciels (par le biais de l'assimilation de données) représente une approche intéressante pour la vérification des grandeurs obtenues expérimentalement. En effet, cette approche permet de déterminer aisément l'erreur associée à une (ou un ensemble de) grandeur uniquement par comparaison des courbes expérimentales et simulées.

Dans la pratique, la simplicité de vérification ainsi que la rapidité d'exécution induite par cette méthode, en font un outil de premier plan. De plus, la possibilité de développer cet outil sous forme d'une fonction accessible depuis un script, permettra d'analyser de manière automatique et itérative les résultats obtenus pour divers échantillons. Cette automatisation ayant l'avantage de simplifier grandement le travail de l'expérimentateur.

7. CONCLUSION

Au cours de cet article, l'utilisation d'un code de calcul spécialisé dans la thermique du bâtiment (CODYRUN) a été présenté comme observateur d'état. L'approche particulière proposée, basée sur l'assimilation de données et la vérification expérimentale, a permis de modéliser une paroi multi-couches en vue de vérifier les propriétés thermiques (ρ , λ , et c_p) de l'un de ses constituants. Le capteur logiciel ainsi défini a permis une vérification des propriétés thermiques en fonction des conditions d'utilisation.

Cette approche a l'avantage de pouvoir être effectuée sur toute surface pouvant être expérimentée. Elle est donc particulièrement adaptée à la caractérisation thermiques *in situ* des parois. De plus, dans le cas de caractérisation de parois déjà établies, elle a l'avantage de ne pas être destructrice. Par contre elle possède l'inconvénient de nécessiter des expérimentations (autant que de

conditions expérimentales souhaitées) dont la durée est fonction de l'inertie du système.

Enfin, cette méthode peut s'avérer lourde si l'optimisation du modèle doit être utilisée. Cette approche sera présentée et développée dans une publication à venir.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Région Haute Normandie (France) et son programme de financement « Région sans frontière » sans lequel nous n'aurions pas pu effectuer ces travaux.

REFERENCES

- [1], Sun, C., Walker, J. P. & Houser, P. R. (2004), 'A methodology for snow data assimilation in a land surface model', Journal of Geophysical Research 109, D08108.
- [2], Nicolsky, D., Romanovsky, V. & Panteleev, G. (2009), 'Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost', Cold Regions Science and Technology 55(1), 120 – 129. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X08000451>
- [3], Scott Stephens, L. & Knospe, C. (1995), 'Determination of power losses in high speed magnetic journal bearings using temperature measurements', Experimental Heat Transfer 8, 33–56.
- [4], Aksoy, A., Zhang, F., Nielsen-Gammon, J. W. & Epifanio, C. (2005), 'Ensemble-based data assimilation for thermally forced circulations', Journal of Geophysical Research 110, D16105.
- [5], Boyer, H., Chabriet, J., Grondin-Perez, B., Tourrand, C. & Brau, J. (1996), 'Thermal building simulation and computer generation of nodal models', Building and Environment 31 (3), 207–214.
- [6], Miranville, F., Boyer, H., Mara, T. & Garde, F. (2003), 'On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions : Modelling and empirical validation', Energy and Buildings 35 (10), 997–1008.
- [7], Miranville, F., Boyer, H., Lauret, P. & Lucas, F. (2008), 'A combined approach for determining the thermal performance of radiant barriers under field conditions', Solar Energy 82 (5), 399–410.
- [8], Fakra, A., Boyer, H., Miranville, F. & Bigot, D. (2011), 'A simple evaluation of global and diffuse luminous efficacy for all sky conditions in tropical and humid climate', Renewable Energy 36(1), 298 – 306. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003150>
- [9], Bigot, D., Miranville, F., Fakra, A. & Boyer, H. (2009), 'A nodal thermal model for photovoltaic systems : Impact on building temperature fields and elements of validation for tropical and humid climatic conditions', Energy and Buildings 41(9), 1117–1126.

[10], Boyer, H., Garde, F., Gatina, J. & Brau, J. (1998), 'A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes', *Energy and Buildings* 28, 71–79.

[11], Boyer, H., Miranville, F., Bigot, D., Guichard, S., Jean, A., Fakra, A. & Calogine, D. (2011), *Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, Intech, chapter 11 - Heat transfer in buildings : application to air solar heating and Trombe wall design, pp. 227–244.

[12], Lauret, P., Boyer, H., Riviere, C. & Bastide, A. (2005), 'A genetic algorithm applied to the validation of building thermal models', *Energy and Buildings* 37, 858–866.

[13], Lauret, A., Mara, T., Boyer, H., Adelard, L. & F., G. (2001), 'A validation methodology aid for improving a

thermal building model : case of diffuse radiation accounting in a tropical climate', *Energy and Buildings* 33(7), 711–718.

[14], Fakra, A., Miranville, F., Boyer, H. & Guichard, S. (2011), 'Development of a new model to predict indoor daylighting : Integration in codyrun software and validation', *Energy Conversion and Management* 52, 2724–2734.

[15], Boyer, H., Lauret, A., Adelard, L. & Mara, T. (1999), 'Building ventilation : a pressure airflow model computer generation and elements of validation', *Energy and Buildings* 29, 283–292.