

Validation expérimentale d'un modèle d'identification des paramètres thermiques du bâtiment

Karim LIMAM¹, Toufik BOUACHE^{1*}, Michael HIETE²

¹ Laboratory of engineering sciences for environment (LaSIE)
University of La Rochelle, France

² CESER – Center for Environmental Systems Research,
University of Kassel, Germany

* auteur correspondant : tbouache@gmail.com

Résumé - On présente dans ce travail le développement et la validation d'un module thermique destiné à l'analyse de la performance énergétique des bâtiments. Celui-ci est couplé à un algorithme d'optimisation qui a pour but l'identification des caractéristiques thermiques (résistances et capacités thermiques) d'une esquisse de bâtiment simplifiée. La signature thermique du bâtiment est basée sur une analogie électrique intégrant les paramètres thermophysiques de ce dernier. Le modèle d'identification s'appuie sur le principe de minimisation lié à une méthode itérative (Reflective Newton), et applique un critère des moindres carrés entre les températures mesurées au sein d'un banc d'essai expérimental contrôlé et les températures calculées par le modèle direct. Pour valider la démarche d'identification, deux configurations expérimentales avec suivi de mesures, ont été retenues. Les résultats d'identifications montrent une assez bonne concordance entre les valeurs identifiées et celles mesurées, avec une variation relative maximale qui ne dépasse pas 21%.

Nomenclature

C	capacité thermique, $J.K^{-1}$	e	couche externe de la structure du bâtiment
e	épaisseur, m	g	gaine
H_i	conductance thermique convective, $W.K^{-1}$	i	couche interne de la structure du bâtiment
H_{i0}	coefficient d'échanges radiatifs, $W.K^{-1}$	in	air intérieur
J	fonction d'erreur	m	parois opaques, à l'exception de la paroi sud
q	flux de chaleur, $W.m^{-2}$	mes	Températures mesurées
R	résistance thermique, $K.W^{-1}$	rm	température radiante
S	surface, m^2	s	paroi sud
t	temps, s		
T	température, °C		

Indices et exposants

1. Introduction

L'analyse du comportement thermique des bâtiments s'effectue généralement par le biais d'approches théoriques et expérimentales. Ces dernières nécessitent le montage et la réalisation de suivis de mesures à l'échelle 1 sur des bâtiments réels (difficilement contrôlables car sous charges en perpétuel changement), ou sur des ambiances en modèles réduits (plus facile à maîtriser mais moins réalistes). Les essais «sur site grandeur nature» restent coûteux, lourds, nécessitant un investissement très important en temps, et (contrairement aux modèles réduits entièrement conçus en laboratoire), ils manquent

d'informations sur leur conception. Certes, moins représentatifs de la réalité qu'un bâtiment réel, les essais sur modèles réduits combinent cependant divers avantages, qui leur confèrent une attraction particulière pour des études de thermique des bâtiments. Les ambiances réduites proposent des designs très simples, didactiques, reproductibles, et en plus flexibles/modulables. Ils permettent de faire varier de nombreux paramètres, et ainsi d'étudier la sensibilité des outils de simulation. De ce fait, et avec un meilleur contrôle des paramètres d'entrée, les ambiances réduites constituent de très bons outils permettant de valider les hypothèses simplificatrices des modèles de simulations thermiques du bâtiment.

Dans les années 80, la commission européenne a lancé un projet de recherche, PASSYS [1]. Un volet du projet a consisté à réaliser des cellules test dans plusieurs pays. Il s'agit de petits bâtiments instrumentés, situés en ambiance extérieure, dont la façade sud peut être démontée et remplacée par divers types de composants: par exemple, une façade standard avec une fenêtre, une façade avec véranda accolée, une façade avec isolation transparente par l'extérieur. Pour répondre à l'objectif initial, le dispositif s'est avéré non pertinent. Dans les travaux de [2], une cellule à ossature bois, en vraie grandeur pour la validation d'outils de simulation thermo-hygro-aérauliques a été conçue. Olivier [3] a aménagé un bâtiment test en plateforme expérimentale où il offre la possibilité de simuler des occupations variables afin de tester le contrôle de composants de ventilation hybride spécifiques. Un modèle numérique sur la base de cette plateforme expérimentale a été développé, et a permis, après validation, une évaluation rapide de multiples stratégies de contrôle multi-sources et multi-zonales. Ulgen [4] a, quant à lui, entrepris une étude expérimentale et numérique de l'effet des propriétés thermophysiques des parois sur le déphasage et l'amortissement de la réponse du bâtiment. Il a suggéré d'utiliser des parois multicouches avec isolation, pour les bâtiments occupés toute la journée et des parois monocouches pour les bâtiments occupés pendant des intervalles de temps spécifiques

On recense ces dernières années divers travaux de recherches, portant sur le développement de modèles thermiques inverses simplifiés. Chaturvedi et Braun [5] ont développé un modèle de bâtiment inverse simplifié, qui est appliqué par Braun et al. [6] avec succès pour évaluer les stratégies de déplacement de charge d'un grand immeuble commercial. Le modèle utilisé, est une représentation thermique par un réseau de résistances et capacités thermiques. Gouda et al. [7] ont également suggéré un modèle de bâtiment de paramètres, basé sur un réseau thermique de résistances et de capacités thermiques. Ils ont estimé les paramètres physiques des murs par une optimisation sous contrainte non linéaire, en utilisant les équations de Kuhn-Tucker. Sambou et al. [8] ont développé un modèle basé sur la méthode des quadripôles thermiques couplé à un algorithme génétique évolutionnaire multi-objectifs. Le but de leur travail était de trouver les meilleurs compromis entre l'isolation thermique et l'inertie thermique d'un mur.

Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en œuvre une cellule à échelle réduite, dans le but d'effectuer une étude thermique expérimentale pour valider une application numérique adaptée consistant par ailleurs à identifier les propriétés thermophysiques des parois de l'ambiance étudiée. Au stade actuel, notre approche s'applique seulement à une configuration expérimentale simple (sans occupation, sans ventilation et sans vitrage). En effet, l'absence d'occupants évite certains phénomènes difficiles à quantifier (apports internes, ouverture des fenêtres, etc.) et permet ainsi une comparaison plus rigoureuse entre les calculs et les mesures. La prochaine étape de ce travail est de tester d'autres configurations expérimentales, comme par exemple, l'effet de l'isolation par l'intérieur et l'extérieur, le rajout de vitrage, l'intégration d'apports internes par le biais de sources de chaleur contrôlées.

2. Montage expérimental

La cellule expérimentale réalisée a une forme cubique de 59,6 cm d'arête. Elle est constituée de panneaux en bois, d'une épaisseur de 18 mm. Les propriétés thermophysiques sont reportées sur le tableau 1 :

λ	ρ	c_p
$W.m^{-1}.K^{-1}$	$kg.m^{-3}$	$J. kg^{-1}.K^{-1}$
0,14	2700	550

Tableau 1 : propriétés thermophysiques de la cellule.

Pour uniformiser la distribution spatiale de la densité de flux, et réduire les pertes thermiques, une gaine de forme parallélépipédique a été conçue. Les parois sont isolées par du polystyrène extrudé et un revêtement réfléchissant. Le jeu de lampe est placé à une distance variable, permettant d'émettre des puissances variables. Un fluxmètre permettant de mesurer la densité flux de chaleur reçue par la paroi sud a été employé.

Une vue d'ensemble du dispositif expérimental est présenté sur la figure 1.

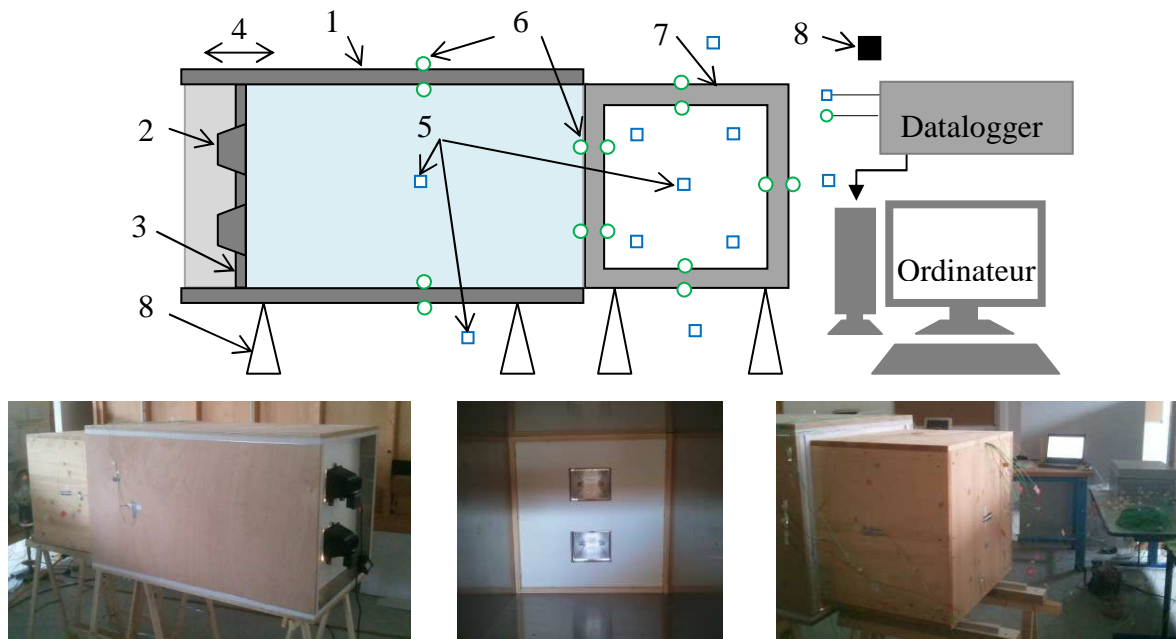


Figure 1 : montage expérimental

- 1 Gaine composée de l'extérieure à l'intérieure : bois, polystyrène et de l'aluminium
- 2 Projecteurs : d'une puissance de 330 W par projecteur.
- 3 Support projecteur.
- 4 Mouvement possible des projecteurs.
- 5 Sonde de PT100 (5 dans le caisson et 1 dans la gaine).
- 6 Thermocouple type K (24 en surface extérieure et 24 en surface intérieure du caisson).
- 7 Caisson expérimental.
- 8 Tynitag.

3. Instrumentation et mesures

Les températures surfaciques de paroi (face intérieure et extérieure), sont mesurées à l'aide des thermocouples de type K et de diamètre $100 \mu m$. La température intérieure est mesurée à l'aide des sondes PT100, placés à différents endroits à l'intérieur du caisson. Les signaux des thermocouples et des sondes PT100 sont récupérés par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition de données. Elle est commandée par un micro-ordinateur et équipée de cartes multiplexées. Nos mesures sont effectuées toutes les 5 minutes.

Avant d'effectuer la procédure d'identification, dans un premier, un travail d'identification expérimentale du flux issu des lampes appliqué sur la surface sud est réalisé. Pour ce faire, un fluxmètre a été utilisé à différentes position de la paroi sud, qui permet de mesure la densité de flux reçue. Deux puissances de flux de chaleur ont été retenues pour notre étude (Figures 2 et 3).

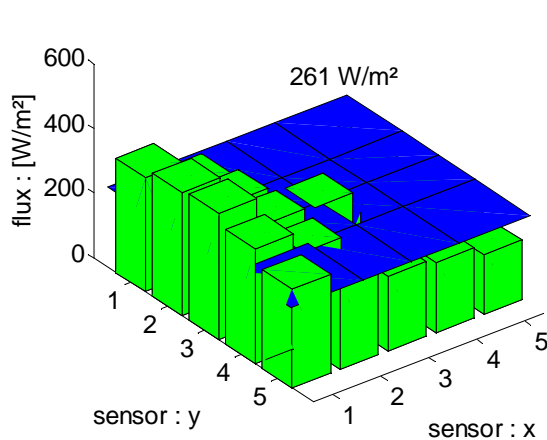


Figure 2 : cas 1 ; $q = 261 \text{ W.m}^{-2}$

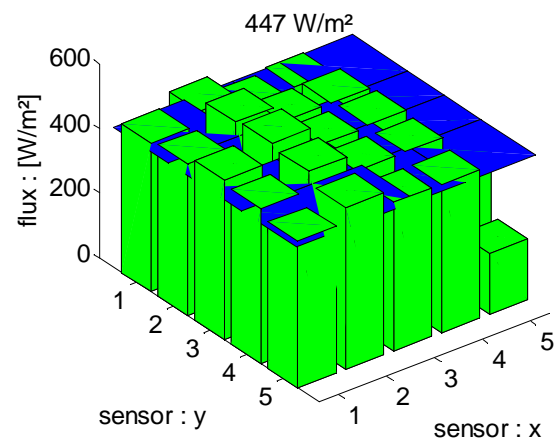


Figure 3 : cas 1 ; $q = 447 \text{ W.m}^{-2}$

Nous présentons sur les figures 4 et 5 l'enregistrement des températures brutes obtenues pour deux flux de chaleur (261 et 447 W.m^{-2}). Ces figures mettent en évidence une montée en température à l'intérieur de la cellule durant la période de chauffage, conséquence de flux de chaleur issu des deux lampes.

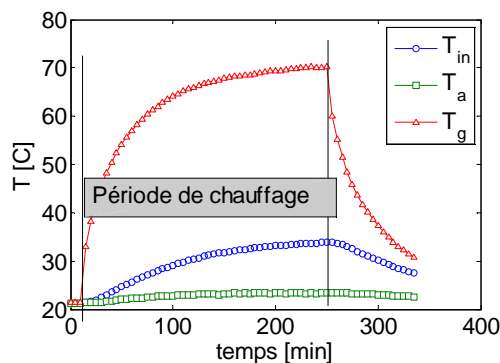


Figure 4 : Températures mesurées à l'intérieure, de l'environnement et dans la gaine : cas 1

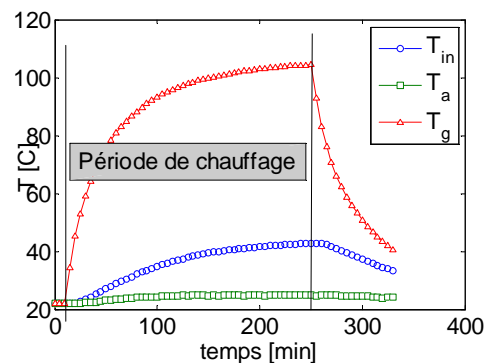


Figure 5 : Températures mesurées à l'intérieure, de l'environnement et dans la gaine : cas 2

4. Modélisation théorique

4.1. Développement d'un modèle thermique adapté

La description du modèle de simulation thermique dynamique est présentée par la Figure 6. Le modèle se base sur le bilan thermique de la cellule expérimentale, considéré comme une zone homogène en température. Le modèle est composé des résistances thermiques et des capacités thermiques des parois, type 1R2C [9]. La surface sud est considérée séparément, du fait de son contact direct avec la gaine, où la température intérieure est beaucoup plus élevée que la température de l'environnement (Figure 1).

En appliquant la loi des nœuds (T_{in} , T_{mi} , T_{me} , T_{si} , T_{se} , T_{rm}) du circuit électrique de la Figure 6, on obtient le système d'équations (1-6) :

$$C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} + H_{mi}(T_{in} - T_{mi}) + H_{si}(T_{in} - T_{si}) = Q_i \quad (1)$$

$$C_{in} \frac{dT_{mi}}{dt} + H_m(T_{mi} - T_{me}) + H_{mi}(T_{mi} - T_{in}) + H_{mi0}(T_{mi} - T_{rm}) = Q_{mi} \quad (2)$$

$$C_{me} \frac{dT_{me}}{dt} + H_m(T_{me} - T_{mi}) + H_{me}(T_{me} - T_a) = 0 \quad (3)$$

$$C_{si} \frac{dT_{si}}{dt} + H_s(T_{si} - T_{se}) + H_{si}(T_{si} - T_{in}) + H_{si0}(T_{si} - T_{rm}) = Q_{si} \quad (4)$$

$$C_{se} \frac{dT_{se}}{dt} + H_s(T_{se} - T_{si}) + H_{se}(T_{se} - T_g) = Q_{se} \quad (5)$$

$$H_{mi0}(T_{rm} - T_{mi}) + H_{si0}(T_{rm} - T_{si}) = Q_{rm} \quad (6)$$

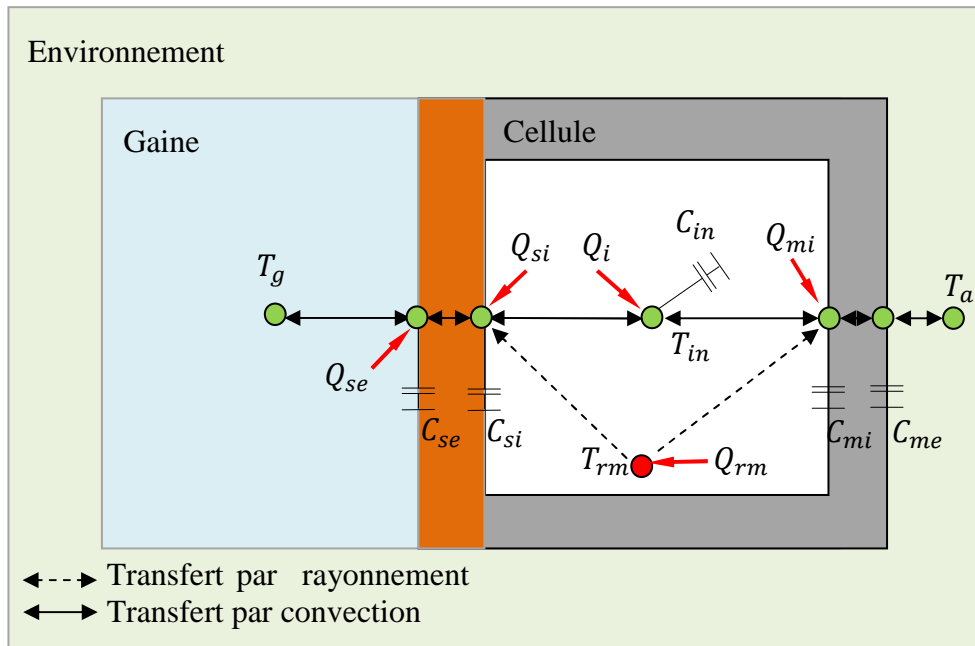


Figure 6 : Schéma équivalent électrique de la cellule expérimentale

Ce système à six équations est résolu à chaque pas de temps par la méthode des différences finis. La discrétisation par rapport au temps est réalisée avec un schéma implicite pur qui présente l'avantage d'être inconditionnellement stable.

4.2. Identification des propriétés thermophysiques des parois de la cellule

L'identification des propriétés thermophysiques de la cellule expérimentale, est réalisée par une méthode itérative « Reflective Newton », une méthode qui a été appliquée avec

succès par les auteurs [10]. L'identification s'appuie sur des mesures en régime transitoire des températures à l'intérieur de la cellule et dans la gaine, ainsi que des températures rattachées à l'environnement immédiat.

Les paramètres que l'on souhaite identifier sont la conductance et les capacités thermiques surfaciques des parois de la cellule. Les informations nécessaires à l'identification sont alors la température mesurée de l'air intérieur de la cellule, les conditions appliquées aux limites durant le chauffage. Il est donc nécessaire d'une part, de connaître parfaitement la répartition spatiale du flux atteignant la face sud de la cellule, et d'autre part, pour le bon fonctionnement de l'algorithme, de définir une plage de recherche paramétrique, bornée par des limites inférieures et supérieures.

Les seuls paramètres inconnus que l'on souhaite identifier sont regroupés dans un vecteur β . Ces paramètres décrivent les caractéristiques thermophysiques de la cellule. L'objectif ici est de minimiser la fonction $J(\beta)$ (Equation 7), qui correspond à l'écart quadratique entre les températures mesurées à l'intérieur du bâtiment et les températures calculées par le modèle thermique développé précédemment. Les différentes étapes de la procédure d'identification sont décrites dans le schéma 7.

$$J(\beta) = \sum_1^N [T_{in}(\beta, t) - T_{mes}(t)]^2 \quad (7)$$

Le flux émis par les lampes halogènes étant connu, les caractéristiques thermophysiques sont estimées par le modèle d'identification en recalant les mesures avec le champ de température transitoire résultant du calcul direct de la température dynamique dans la cellule. Le vecteur des paramètres est initialisé à partir des valeurs initiales, et sont bornés par des limites inférieures et supérieures (Tableau 1). Ces valeurs limites sont données sur la base des propriétés des matériaux constituant les parois types ASHRAE [11].

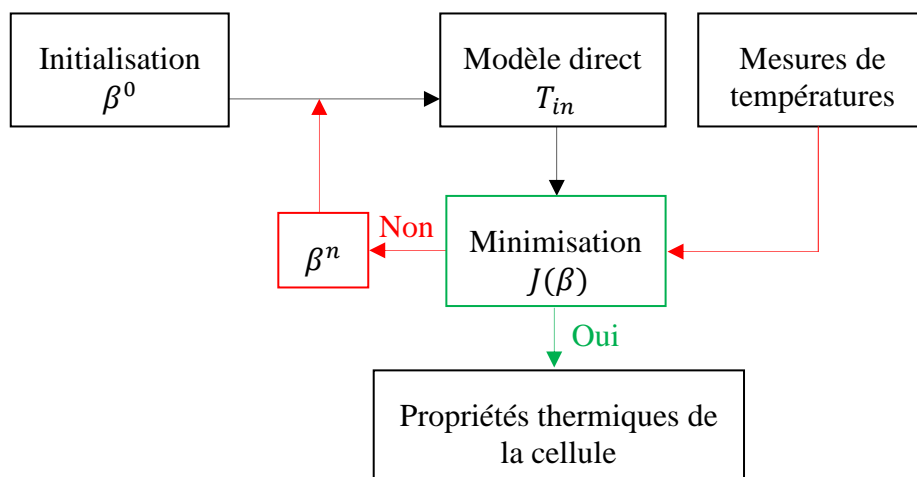


Figure 7 : Algorithme d'identification

L'objectif étant d'identifier les caractéristiques thermophysiques des parois verticales de la cellule expérimentale par le modèle d'identification couplé aux mesures de température. La procédure consiste à rechercher un ensemble optimal de paramètres $J_{opt}(H_m, C_{me}, C_{mi})$, qui minimise la fonction d'erreur $\Delta(J)$, donnée par l'équation (11)

Les résultats de l'identification réalisée à partir des cas 1 et cas 2 sont regroupées respectivement dans les tableaux 2 et 3.

	H_m $W.K^{-1}$	C_{me} $J.K^{-1}$	C_{mi} $J.K^{-1}$
Valeurs initiales	10	10^4	10^4
[limite inf, limite sup]	[0.1, 50]	$[10^3, 10^6]$	$[10^3, 10^6]$
Valeurs identifiées	11,18	1908	18186
Valeurs exactes	10,27	1960.2	17430
Ecart relatif (%)	7,22	20,7	4,34

Tableau 2: Résultats de l'identification pour le cas 1 : $q = 261 W.m^{-2}$

	H_m $W.K^{-1}$	C_{me} $J.K^{-1}$	C_{mi} $J.K^{-1}$
Valeurs initiales	10	10^4	10^4
[limite inf, limite sup]	[0.1, 50]	$[10^3, 10^6]$	$[10^3, 10^6]$
Valeurs identifiées	11,32	2372	20101
Valeurs exactes	10,27	1960,2	17430
Ecart relatif (%)	10,22	20,25	15,32

Tableau. 3: Résultats de l'identification pour le cas 1 : $q = 447 W.m^{-2}$

Nous constatons que les paramètres H_m , C_{me} et C_{mi} sont identifiés avec une incertitude relative maximale de 21%. Les incertitudes relatives calculées sur C_{me} sont plus élevées par rapport à H_m et C_{mi} . Ce qui était prévisible après l'analyse de sensibilité menée sur les différents paramètres. On note sur la figure 9, qui représente l'évolution temporelle de l'indice de sensibilité réduit vis-à-vis des trois paramètres, que la température intérieure est moins sensible à la capacité thermique surfacique C_{me} , ce qui explique les difficultés rencontrées par l'algorithme pour l'identifier.

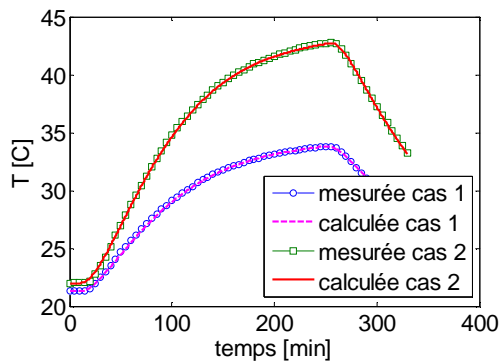


Figure 8 : Comparaison de températures calculées et expérimentales

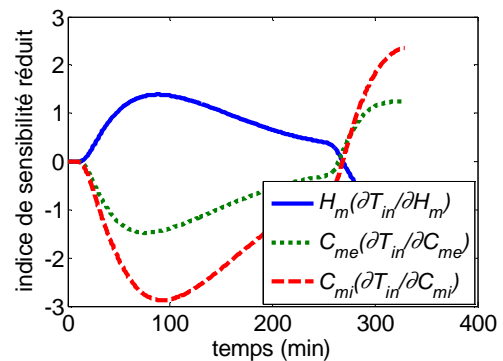


Figure 9 : Sensibilités aux paramètres du problème

5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une démarche globale qui consiste à mettre au point une cellule d'essai pour un suivi de mesures à échelle réduite, mais également de proposer une application numérique d'identification pour atteindre certaines propriétés thermophysiques des parois de l'ambiance étudiée. Après avoir conçu et mis en place un banc expérimental, nous avons développé à cet effet un modèle thermique adapté (décrivant l'évolution de la température intérieure de la cellule en fonction des paramètres thermiques de la cellule). Ensuite, une identification des paramètres clés, a été réalisée en effectuant une minimisation d'un critère des moindres carrés par l'algorithme « Reflective-Newton ». Bien qu'il s'agisse ici d'un cas d'école relativement simple et présentant l'avantage d'être

rigoureusement contrôlé où l'apport scientifique réside dans la démarche de validation des modèles d'optimisation thermique, la prochaine étape de ce travail est de tester d'autres configurations expérimentales, comme par exemple, l'effet de l'isolation par l'intérieur et l'extérieur, le rajout de vitrage, l'intégration d'apports internes par le biais de sources de chaleur contrôlées (chauffage, occupation...).

Références

- [1] PASSYS: Projet sur l'énergie solaire passive. Transferts des résultats au CEN (Comité Européen de Normalisation), CENERG Ecole des Mines de Paris, 1986-1992.
- [2] Amandine Piot, Charlotte Abelé, Monika Woloszyn, Jean Brau, Cellule expérimentale en vraie grandeur pour la validation des outils de simulation thermo-hygro-aérauliques. Conférence IBPSA France, Lyon, novembre 2008.
- [3] Olivier Jung, Mohamed El Mankibi, Andrea Kindinis, and Pierre Michel (2011) Hybrid Ventilation for Multi-Zone Buildings - Development of Optimal Control Strategies through Experiments and Dynamic Modelling. *International Journal of Ventilation*: March 1, 2011, Vol. 9, No. 4, pp. 305-313.
- [4] Ulgen K. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Building*, 2002, 34, pp. 273-278.
- [5] Chaturvedi, N. and Braun, J.E. 2002. "An Inverse Grey-Box Model for Transient Building Load Prediction", *International Journal of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigerating Research*, Vol.8, No.1, pp.73-100.
- [6] Braun, J.E., Lawrence, T.M., Klaassen, C.J., and House, J.M. 2002. "Demonstration of Load Shifting and Peak Load Reduction with Control of Building Thermal Mass", *Proceeding of the 2002 ACEEE Conference on Energy Efficiency in Buildings*, Monterey, CA.
- [7] Gouda, M.M., Danaher, S., and Underwood, C.P. 2002. "Building Thermal Model Reduction Using Nonlinear Constrained Optimization", *Building and Environment*, Vol.37, pp.1255-1265.
- [8] Sambou V, Lartigue B, Monchoux F, Adj M. Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 41, p. 1031–1036.
- [9] ROUX, J.J. Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments. *Thèse de Doctorat : INSA de Lyon*. 1984, 201 p.
- [10] Ginestet S, Bouache T, Limam K, Lindner G. Thermal identification of building multilayer walls using reflective-Newton algorithm applied to quadrupol modelling, *revue Energy and Buildings*, Volume 60, May 2013, pp 139-145.
- [11] ASHRAE, *Handbook of Fundamentals (SI Edition)*, Atlanta: Robert Parsons, 1997, 576p.