

Des méthodes ensemblistes pour le diagnostic des performances énergétiques des bâtiments

Rania MERHEB^{1*}, Laurent MORA¹, Elena PALOMO¹

¹ I2M Dépt TREFLE - UMR CNRS 5295

Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence Cedex

* rania.merheb@ensam.eu

Résumé - Ce papier vise à intégrer les méthodes d'analyse par intervalles dans des opérations de diagnostic de l'enveloppe des bâtiments. Une inversion ensembliste est appliquée pour estimer la résistance thermique de la couche isolante d'un cas pratique de paroi multicouches dans des conditions climatiques réelles. Les résultats d'estimation montrent la capacité de cette méthode de remonter finement aux caractéristiques recherchées en présence de bruit de mesure.

Nomenclature

C_p	capacité calorifique massique,	ρ	masse volumique, kg/m^3
$KJ/(K.Kg)$		λ	conductivité thermique, $W/(m.K)$
L	largeur, m	φ	densité du flux de chaleur, W/m^2
h_i	coefficient d'échange convectif	<i>Indices et exposants</i>	
T	température, k	<i>int</i>	intérieur
<i>Symboles grecs</i>		<i>ext</i>	extérieur
α	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$		

1. Introduction

La réalisation d'un audit est devenue obligatoire pour tous les bâtiments collectifs de plus de 50 lots et dont le permis de construire a été déposé avant le 1er juin 2001. Cette opération est également obligatoire pour les entreprises soit de plus de 250 salariés, soit réalisant un chiffre d'affaires hors taxe annuel de plus de 50 millions d'euros ou un total de bilan de plus de 43 millions d'euros. Le but d'un audit est d'identifier les secteurs dans lesquels des économies d'énergie sont possibles et de proposer des solutions d'amélioration. Dans le cadre d'un audit détaillé, un diagnostic de l'enveloppe, plus particulièrement la caractérisation des propriétés d'isolation, pourra être très intéressante.

Le diagnostic de l'enveloppe des bâtiments a fait l'objet de nombreuses études. La thermographie infrarouge est parmi les techniques mises en place pour l'inspection et la réalisation des tests non destructif pour les composants d'un bâtiment, pour la détection des fuites d'énergie à travers l'enveloppe, pour identifier les problèmes des installations électriques et mécaniques et pour la collecte des données afin de préciser les conditions de fonctionnement difficile à atteindre comme le chauffage, la ventilation et la climatisation. Cette technique est souvent employée pour détecter les défauts et peut constituer également une méthode rapide et fiable pour le diagnostic des façades d'un bâtiment en particulier de la couche isolante. Dans [1] les auteurs décrivent un système à base de connaissance pour un diagnostic non destructif des façades d'isolation tout en fusionnant les informations extraites des images obtenues de 2 bandes d'ondes électromagnétiques : des images infrarouge de basse résolution et des images de haute résolution de type RGB. Une collecte des informations concernant les principales zones où la technique infrarouge (IR) a été employée pour le diagnostic des bâtiments est réalisée dans [2]. Cette étude peut servir pour identifier les problèmes potentiels et définir les priorités pour la maintenance préventive et prédictive ou la nécessité d'intervention immédiate afin de minimiser le risque d'échec. Cette technique

a été également utilisée dans [3] pour déterminer la résistance thermique pour différents parois multicouches commerciaux par des expériences réalisées au sein d'un laboratoire. Cette étude a permis de fournir des informations quantitatives sachant que toutes les études exécutées auparavant étaient qualitatives. Une étude numérique pour le diagnostic de l'enveloppe des bâtiments a été réalisée dans [4] permettant d'estimer la résistance thermique équivalente d'une paroi et les charges internes reçues par cette paroi à partir de 4 mesures : La température ambiante interne et externe et les températures de surface de la paroi des 2 côtés.

La résistance thermique d'une paroi est parmi les paramètres les plus influents sur la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment ([5], [6]), notamment la résistance thermique de la couche isolante. Pour des soucis de limitation de la consommation d'énergie, un bon fonctionnement énergétique du bâtiment est exigé. Dans ce qui suit nous allons proposer une étude numérique dont l'application est non destructive, à base de méthodes ensemblistes, permettant d'estimer à la fois la conductivité et l'épaisseur de la couche isolante d'une paroi multicouche. Une seule mesure nous sera nécessaire. La méthode proposée pourra constituer une méthode de diagnostic de l'enveloppe d'un bâtiment.

2. Outils et méthodes

L'analyse par intervalles a été initialement développée par Ramon Moore [7], pour limiter la cumulation des erreurs numériques dues à la représentation des réels suivant un type de codage à précision limitée par les calculateurs électroniques. D'où l'avantage de l'analyse par intervalle où on représente le réel par un intervalle qui le contient, avec garantie que l'intervalle solution contient la vraie solution recherchée.

2.1. Définitions

On peut définir l'intervalle comme étant l'ensemble des réels respectant :

$$[\underline{X}; \overline{X}] = \{x \in \mathbb{R} / \underline{X} \leq x \leq \overline{X}\} \quad (1)$$

où \underline{X} et \overline{X} représentent respectivement la borne minimale et maximale de l'intervalle.

La longueur d'un intervalle est donnée par l'expression suivante :

$$w([X]) = \overline{X} - \underline{X} \quad (2)$$

2.2. Fonction d'inclusion

Le calcul par intervalles manipule des opérations arithmétiques, tout comme les réels. Pour des opérations simples, ce calcul est facile mais pour des opérations complexes ce calcul devient de plus en plus difficile et pessimiste. Ce problème justifie la complexité de construire une fonction d'inclusion qui correspond à l'évaluation des fonctions vectorielles dont les variables sont des intervalles. Le but du calcul par intervalles est de trouver une fonction d'inclusion minimale. Dans [8] nous avons testé une fonction d'inclusion appelée méthode d'encadrement hybride et nous avons pu démontrer qu'elle est minimale et non pessimiste. Cette fonction sera utilisée pour la suite pour répondre à nos objectifs.

Cette fonction d'inclusion permet une résolution exacte des systèmes différentiels en surveillant le signe de la dérivée partielle par rapport aux paramètres incertains pour construire un encadrement de la solution numérique. Ce qui nous intéresse pour cette méthode est le cas traité pour les systèmes où la dérivée partielle change de signe sur l'intervalle d'intégration. Dans ce cas, le système admet un encadrement sur chaque intervalle de temps où le modèle est monotone en fonctions des paramètres incertains. C'est pourquoi les

systèmes d'encadrement supérieur et inférieur sont définis par morceaux par des équations différentielles non linéaires et peuvent donc être considérés comme des systèmes dynamiques hybrides. Ils peuvent être modélisés par un automate hybride, où l'état hybride englobe à la fois des composants à temps discret et des variables d'état en temps continu.

2.3. Algorithme d'inversion ensembliste SIVIA

L'algorithme SIVIA (Set Inversion Via Interval Analysis) a été initialement défini dans [9]. Il est applicable pour toute fonction ayant une fonction d'inclusion. La structure de base de cet algorithme, tel que définie dans [9], peut être résumé par les étapes suivantes :

Les entrées à définir

Fonction d'inclusion de la réponse analytique : $[H]$

L'ensemble à inverser (réponse expérimentale bruitée) : $[y]$

Le pavé initial du paramètre à estimer : $[p](0)$

Précision requise pour le sous-pavage ou la bisection (critère d'arrêt) : ε

Initialisation

$$K = 0, \text{ Pile} = \phi, \underline{S} = \phi, \bar{S} = \phi$$

Itération K

Etape 1 : si $[H]([p](k)) \subset [y]$ alors $\underline{S} = \underline{S} \cup [p](k)$, passez à l'étape 4

Etape 2 : si $[H]([p](k)) \cap [y] = \phi$ alors passez à l'étape 4

Etape 3 : si $w([p](k)) < \varepsilon$ alors $\underline{S} = \underline{S} \cup [p](k)$,

Si non partager $[x](k)$ selon une méthode prédéfinie et empiler les 2 pavés

résultants

Etape 4 : si la pile n'est pas vide, alors désempilez en $[p](k+1)$, incrémentez k et revenez à l'étape 1

Fin

Cet algorithme fournit une estimation donnée par un ensemble de solutions S correspondant à une approximation interne de la solution \underline{S} et une approximation externe \bar{S} . Dans une telle inversion, nous pouvons dire que, l'intervalle $[p]$ est réalisable ($[p] \in S$), donc $[p]$ appartient à l'approximation interne de S (et à l'approximation externe \bar{S}), si $[H]([p]) \subset [y]$ donc la fonction d'inclusion de la réponse analytique sur $[p]$ est incluse dans la réponse expérimentale bruitée. Si $[H]([p]) \cap [y] = \phi$, donc l'intersection entre la fonction d'inclusion de la réponse analytique sur $[p]$ et la réponse expérimentale bruitée est un ensemble vide quelque soit l'instant t , nous pouvons affirmer que $[p]$ est irréalisable ($[p] \cap S = \phi$), il est donc hors de l'approximation externe \bar{S} de S . C'est ce que nous appelons les tests d'inclusion/exclusion définis par les étapes 1 et 2 de l'algorithme ci-dessus. Si $[p]$ ne vérifie aucune des 2 précédentes conditions, $[p]$ est appelé pavé ambigu, l'algorithme passe au sous-pavage et les tests d'inclusion/d'exclusion seront appliqués à ces sous-pavés (étape 3); ε , le critère d'arrêt, représente la précision requise pour les sous-pavés. A la fin de l'algorithme, tous les pavés ambigus auront une longueur inférieure à ε .

Si le pavé initial $[p](0)$ ne contient pas l'ensemble des solutions, l'algorithme retourne un pavé vide.

3. Présentation du cas test

Nous considérons le problème de la diffusion de la chaleur en régime variable au travers d'une paroi multicouche d'épaisseur L ($L=0.378$ m), dont ses composantes et les caractéristiques correspondantes sont détaillées dans le tableau 1, les matériaux sont listés de l'intérieur vers l'extérieur. Une isolation interne en laine de verre est considérée.

On considère des conditions aux limites de 3ème espèce (condition de Fourier). Pour attribuer des valeurs aux coefficients d'échanges convectifs internes et externes, nombreuses études proposent des valeurs pour ces coefficients selon la vitesse du vent et les conditions de température. En se basant sur le cahier d'algorithmes Comfie [10] nous avons considéré une valeur de $8,13$ [$W/(m^2.K)$] pour le coefficient d'échange interne h_{int} et $18,2$ [$W/(m^2.K)$] pour le coefficient d'échange externe h_{ext} .

La face interne de la paroi échange uniquement de la chaleur par convection. Nous avons considéré la période hivernale (janvier-février) pour pouvoir fixer la température interne à $19^\circ C$ ou 292 K, supposée comme température de confort. La face externe est en contact avec la température extérieure et échange de la chaleur par convection, elle est également exposée au soleil donc elle reçoit du rayonnement de courtes longueurs d'ondes représenté par φ_{ext} . Les échanges radiatifs avec le ciel et l'environnement ne sont pas pris en compte dans cette étude. Nous nous sommes servis d'un fichier météo de la ville de Bordeaux pour prendre en compte la variation de la température externe et pour le calcul du rayonnement global absorbé par la surface considérée. Pour le calcul du rayonnement global reçu par la face externe nous nous sommes basés sur le cahier d'algorithmes Comfie [10]. La paroi considérée est supposée orientée sud.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

En partant de l'expression (3) qui régit la conduction monodimensionnelle dans les solides, le développement en série de Taylor de la dérivée seconde nous donne l'expression aux dérivées partielles de la température en un nœud i (intermédiaire) en fonction des températures aux nœuds voisins :

$$\frac{\partial T}{\partial t}(i,t) = \frac{\alpha}{\Delta x^2} (T(i-1,t) - 2T(i,t) + T(i+1,t)) \quad (4)$$

Pour les nœuds extrêmes, en se servant des conditions aux limites et de la loi de conservation de l'énergie, on obtient les expressions suivantes :

$$\frac{\partial T}{\partial t}(1,t) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(1,t) = \frac{\alpha}{\Delta x^2} \left(-2 \left(1 + \frac{B_{int}}{N} \right) T(1,t) + 2T(2,t) \right) + \frac{\alpha}{\Delta x^2} \frac{2B_{int}}{N} T_{int} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}(N,t) = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(N,t) = \frac{\alpha}{\Delta x^2} \left(-2 \left(1 + \frac{B_{ext}}{N} \right) T(N,t) + 2T(N-1,t) \right) + \frac{\alpha}{\Delta x^2} \frac{2B_{ext}}{N} \left(T_{ext} + \frac{\varphi_{ext}}{h_{ext}} \right) \quad (6)$$

où N est le nombre de nœuds ($N=26$), le nombre de Biot $B_i = \frac{h_i L}{\lambda}$ et la diffusivité

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Le flux surfacique est donné par la loi de Fourier :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \approx -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad (7)$$

Nous avons considéré une période de 1000 heures, donc 1000 données et mesures, donc ce qui correspond à 40 jours. Le système répond lentement aux sollicitations externes vu l'épaisseur importante de la couche d'isolation d'où la nécessité de considérer une longue période de mesure.

	λ W/(m.K)]	ρC_p J/(m ³ .K)	L m
Plaque de plâtre	0,32	680000	0,013
Isolant: laine de verre	0,041	10080	0,15
Bloc béton creux	1,05	842400	0,2
Enduit ciment	1,15	1700000	0,015

Tableau 1 : Composantes de la paroi multicouche et leurs caractéristiques

4. Simulations et résultats

4.1. Etude de sensibilité

Une étude de sensibilité locale est réalisée pour décider à partir de quelle mesure nous allons estimer la conductivité et l'épaisseur de la couche isolante, donc pour faire le choix du capteur à utiliser ainsi que son emplacement. Dans ce but, nous avons fait varier les valeurs de la conductivité et l'épaisseur, données par le fabricant, de 1% de leurs valeurs nominales et nous avons étudié la sensibilité de la température interne, du flux surfacique interne et de la température externe en fonction de ces paramètres pendant la durée considérée. Les variations de l'indice de sensibilité en fonction du temps pour la température interne, de la température externe et du flux surfacique interne sont données par les figures 1, 2 et 3 respectivement. L'expression de l'indice de sensibilité est donnée par (8).

$$IS_i(t) = X_i \frac{\Delta y(t)}{\Delta X_i} \quad (8)$$

Où X_i représente le paramètre étudié, ΔX_i la variation appliquée à ce paramètre et $\Delta y(t)$ la variation de la sortie considéré dû à la variation du paramètre X_i .

En observant les résultats de l'étude de sensibilité, on voit que la température interne et la température externe sont peu sensibles aux paramètres d'intérêt alors que le flux interne est le plus sensible à ces paramètres. Pour une bonne estimation, la sortie à inverser doit être très sensible aux paramètres à estimer. Nous avons choisi alors de faire l'estimation à partir de la mesure du flux interne comme il est le plus sensible à ces paramètres. Par conséquent, pour estimer la conductivité et l'épaisseur de la couche isolante, un fluxmètre est nécessaire.

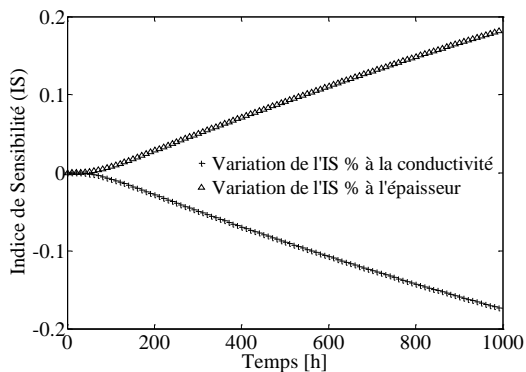


Figure 1 : *Indice de sensibilité de la température surfacique interne*

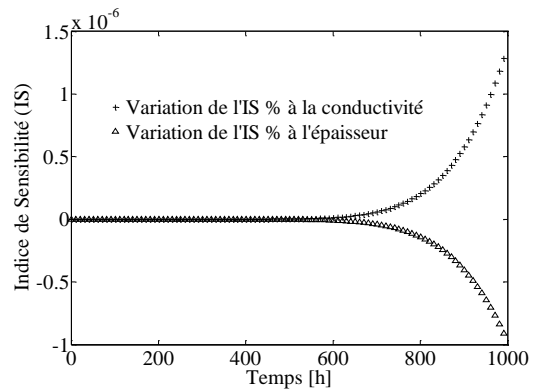


Figure 2 : *Indice de sensibilité de la température surfacique externe*

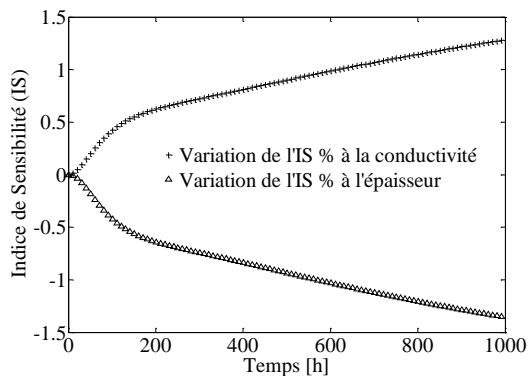


Figure 3 : *Indice de sensibilité du flux surfacique interne*

4.2. Méthode d'estimation

Pour estimer la conductivité et l'épaisseur de la couche isolante dont le rapport représente la résistance thermique de l'isolation, nous avons combiné la résolution exacte du système différentiel ou la méthode d'encadrement hybride, décrite dans la partie 2.2, et l'algorithme d'inversion ensembliste SIVIA décrit dans la partie 2.3. En effet, c'est l'équivalent à la propagation d'incertitudes de la conductivité et de l'épaisseur sur le flux à chaque itération de l'inversion ensembliste : Nous construisons la fonction d'inclusion du flux par portion où ce flux reste monotone par rapport à la conductivité et l'épaisseur. Au départ de l'algorithme, on part avec des intervalles initiaux des paramètres à estimer de largeur importante de façon à inclure leur valeur nominale dans ces intervalles pour ne pas avoir une solution vide.

Le signal expérimental à inverser, donc le flux surfacique est donné par la figure 4 avec des conditions initiales particulières. Ce signal n'est pas généré à partir de mesures mais à partir de l'expression du flux donnée par l'expression (7) en ajoutant un bruit de mesure. Comme évoqué auparavant, cette étude est une étude numérique et une validation expérimentale sera une suite intéressante. Pour le bruit de mesure, nous avons considéré une valeur de $\pm 0,1$ [W/m²], ce qui correspond à 3% de la valeur maximale du flux.

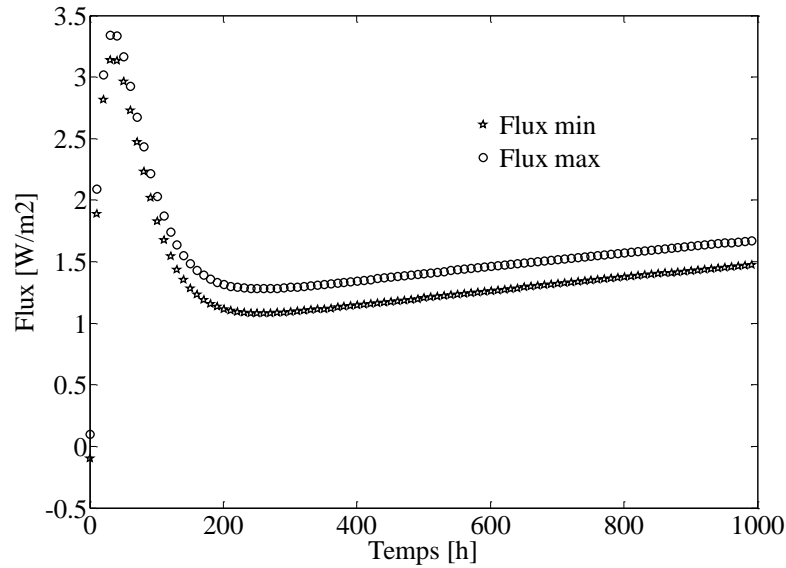


Figure 4 : *Signal expérimental bruité*

4.3. Résultats de l'estimation

Le résultat de l'estimation est donné par la figure 5. Le code couleur est le suivant : les solutions acceptables sont représentées par les pavés gris foncés, les solutions ambiguës par les pavés gris clairs alors que les solutions inacceptables par les pavés blancs.

Le résultat de l'estimation montre que la méthode proposée est capable de fournir des estimations acceptables, ce qui prouve que la résolution exacte du système différentiel n'est pas pessimiste. Un autre avantage de cette méthode est le fait de représenter la corrélation entre la conductivité et l'épaisseur, sans aucune hypothèse initiale. Suite à cette estimation on peut en déduire une estimation de la résistance thermique recherchée.

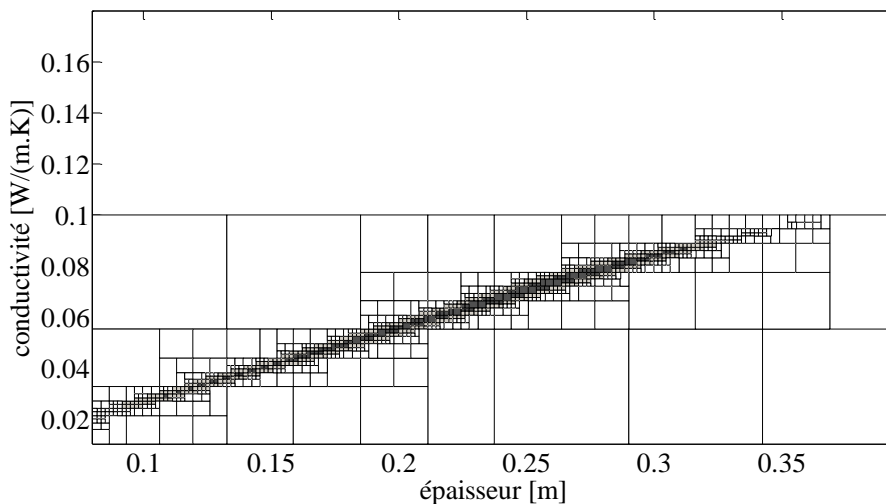


Figure 5 : *Estimation de l'épaisseur et de la conductivité de la couche isolante de la paroi considérée*

5. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons combiné la résolution exacte du système différentiel avec l'algorithme SIVIA pour déterminer la conductivité et l'épaisseur de la couche isolante d'une paroi multicouche dans le but de caractériser cette paroi. Cette méthode peut être intéressante pour un audit détaillé des bâtiments. Les résultats d'estimation prouvent l'efficacité de ce genre de méthode pour une estimation fiable de caractéristiques assez influentes sur le comportement thermique d'un bâtiment. Les résultats d'estimation sont très encourageants.

Pour un diagnostic de l'enveloppe d'un bâtiment en site, selon [4], 3 conditions du protocole sont nécessaires :

- facile à implémenter
- non intrusive, donc des mesures non destructives
- rapide, donc une courte période de mesure

Comme perspective, nous allons se baser sur ces 3 dernières conditions pour élaborer un protocole de diagnostic permettant de valider la méthode proposée expérimentalement et puis après sur le site avec des données en temps réel.

Références

- [1] Slobodan Ribaric, Darijan Marcetic, Denis Stjepan Vedrina, «A knowledge-based system for the non-destructive diagnostics of façade isolation using the information fusion of visual and IR images», *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 3812-3823, 2009.
- [2] C.A. Balaras, A.A. Argiriou, «Infrared thermography for building diagnostics», *Energy and Building*, vol. 34, pp. 171-183, 2002.
- [3] M. H.A. Larbi Youcef, L. Ibos, V. Feuillet, P. Balcon, Y. Candau, A. Filloux, «Diagnostic of insulated building walls of old restored constructions using active infrared thermography», 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Québec, Canada, 2010.
- [4] Alexandre Nassiopoulos, Frédéric Bourquin, «Inverse modeling for the assessment of energy performance: Estimation of envelope thermal characteristics», 12th International IBPSA Conference, Sydney, Australia, 2011.
- [5] De Wit M.S., «Identification of the important parameters in thermal building simulation models», *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 57, pp. 305-320, 1997.
- [6] I. A. MacDonald, «Quantifying the effects of uncertainty in building simulation», Thèse de Doctorat, Université de Strathclyde, 2002.
- [7] Ramon Moore, «Interval Analysis», Prentice-Hall, 1966.
- [8] R. MERHEB, L. MORA, E. PALOMO, «L'analyse par intervalles pour une prévision fiable du comportement des bâtiments : cas d'une paroi multicouche», SFT 2012, Bordeaux.
- [9] Jaulin L., Walter E., «Set inversion via interval analysis for non linear bounded-error estimation», *Automatica*, vol. 29(4), pp. 1053-1064, 1993.
- [10] Méthode COMFIE, Cahier d'algorithmes, guide d'utilisation Comfie.