

Nouvelle approche d'identification par inversion des paramètres thermiques du bâtiment

Toufik BOUACHE*, Karim LIMAM

Laboratory of engineering sciences for environment (LaSIE)

University of La Rochelle, France

*auteur correspondant : tbouache@gmail.com

Résumé - Dans ce travail, on développe un modèle thermique, destiné à la simulation thermique dynamique des bâtiments. Ce modèle est utilisé pour le développement d'une méthodologie inverse, qui a pour but d'identifier un ensemble de paramètres thermiques (résistances et capacités), qui décrit le comportement thermique global d'un bâtiment. Ce modèle tient compte, des conditions aux limites (température extérieures, rayonnement solaire, ...) d'une part, et des gains internes (chauffage, occupations, ...) d'autre part. Nous avons validé ce modèle par comparaison avec les résultats calculés sous l'environnement TRNSYS, les écarts obtenus sont toujours inférieure à 11%. Les valeurs des résistances et des capacités thermiques sont estimées par une méthode itérative (Reflective Newton). L'approche développée a été appliquée avec succès à différents modèles de bâtiment mono-zone et pour différents jeux de paramètres de conception (taux de vitrage, résistance thermique, inertie thermique).

Nomenclature

C	capacité thermique, $J.K^{-1}$	0	couche externe de la structure du bâtiment
e	épaisseur, m	1	couche interne de la structure du bâtiment
H_i	conductance thermique convective, $W.K^{-1}$	b	planchers bas
H_{ij}	coefficient d'échanges radiatifs, $W.K^{-1}$	bl	débit du renouvellement d'air
J	fonction d'erreur	c	voûte céleste
q	flux de chaleur, $W.m^{-2}$	h	planchers hauts
R	résistance thermique, $K.W^{-1}$	in	air intérieur
S	surfaces, m^2	m	parois verticales
t	temps, s	s	solaire
T	température, $^{\circ}C$	w	fenêtres
<i>Indices et exposants</i>			

1. Introduction

Pour atteindre un niveau de performance énergétique plus élevé pour le bâtiment, il est indispensable de développer de nouvelles approches d'identification thermiques, permettant de prendre en compte, et avec exactitudes les différents paramètres caractérisant le bâtiment (les propriétés thermiques des parois, les sollicitations thermiques, les infiltrations d'air, ...). Au cours des dernières années, un effort important a été déployé dans cette direction. De ce point de vue, les codes numériques standards sont aujourd'hui des outils irremplaçables pour une analyse rapide et efficace du comportement thermique des bâtiments.

La réponse thermique d'un bâtiment est le plus souvent schématisée par un ensemble de résistances et de capacités thermiques. L'analogie électriques a longtemps été exploitée [1, 2]. Bien que théoriquement une description complète et détaillée d'un bâtiment et de ses conditions aux limites thermiques soit conceptuellement possible, celle-ci est pratiquement irréalisable. De nombreux travaux sont dédiés à l'optimisation de l'isolation thermique des enveloppes de bâtiment. Mahlia et al [3] ont établi une corrélation entre la conductivité

thermique de l'isolant et son épaisseur optimale sous la forme d'un polynôme de second ordre. Comakli and Yuksel [4] ont déterminé l'épaisseur optimale de l'isolation d'un mur extérieur en se basant sur le cycle de vie des bâtiments dans les villes les plus froides de la Turquie. Lollina et al. [5] ont entrepris une étude afin de déterminer le meilleur niveau d'isolation des bâtiments neufs d'un point de vue énergétique, économique et environnemental. Toutes ces études se sont focalisées sur l'aspect lié à l'isolation tout en ignorant les effets de l'inertie thermique. Le rôle de l'inertie thermique dans le bâtiment a été mis en exergue dans les travaux de Balaras [6], qui a étudié son impact sur la charge de climatisation d'un bâtiment. Ulgen [8] a quant à lui entrepris une étude théorique et expérimentale sur l'effet des propriétés thermophysiques des parois sur le déphasage et l'amortissement de la réponse du bâtiment. McKinley et al. [9] ont présenté une procédure d'optimisation des paramètres thermiques d'un bâtiment (résistance thermique et inertie thermique). Le modèle direct est résolu numériquement et l'optimisation est effectuée par l'algorithme « Reflective-Newton », Sambou et al. [10] 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. Les solutions sont présentées sous forme d'un front de pareto (un ensemble de solutions non dominées, solutions parmi lesquelles on ne peut décider si une solution est meilleure qu'une autre, aucune n'étant systématiquement inférieure aux autres sur tous les objectifs).

Dans ce travail, on développe un modèle numérique, destiné à la simulation thermique dynamique des bâtiments. Ce modèle est utilisé pour le développement d'une méthodologie inverse, qui a pour but d'identifier un ensemble de paramètres thermiques (résistance et capacité), qui décrit le comportement thermique global d'un bâtiment. Ce modèle tient compte, des conditions aux limites (température extérieures, rayonnement solaire, ...), et des gains internes (chauffage, occupations, ...). Les valeurs des résistances et des capacités thermiques sont estimées par une méthode itérative de (Reflective Newton). L'approche développée a été appliquée avec succès à différents modèles de bâtiment monozone et pour différents jeux de paramètres de conception (taux de vitrage, résistance thermique, inertie thermique de l'enveloppe).

La motivation première de cette approche, est de fournir aux auditeurs de bâtiments, un outil, qui permet de donner une réponse thermique du bâtiment cible, et d'estimer rapidement ces caractéristiques thermiques. Un tel modèle permet d'avoir un control thermique optimal et rapide du bâtiment.

2. Approche directe : Modèle Thermique Direct, MTD

La description du modèle de simulation thermique dynamique est présentée par la Figure 1. Le modèle se base sur le bilan thermique d'une zone homogène en température. Pour un traitement numérique plus efficace, il regroupe l'ensemble des parois extérieures, le plafond, les vitrages et les portes. Le modèle est composé de résistances thermiques et de capacités thermiques. Les entrées des gains internes sont directement appliquées à la température de l'air interne T_{in} . Une capacité thermique, représentant l'inertie thermique de l'air est lui associée C_{in} , y compris la contribution des murs internes. La température de l'air interne est liée à la température de l'air externe T_0 , par deux modes de transferts. Un transfert thermique du à la convection, représenté par la conductance thermique du renouvellement d'air (H_{bl}), et enfin un mode de transfert par conduction via les parois extérieures (opaques et vitrées). Les échanges conductifs via les parois vitrées et les portes, sont en régime permanent et sont représentés respectivement à l'aide des conductances (H_w et H_p). Il s'agit d'un modèle analogique du type 1R. Les échanges conductifs au sein des parois extérieures, les planchers

bas et les planchers hauts, sont considérés en régime variable. Nous utilisons les modèles analogiques 1R2C (une capacité sur chacune des faces), et une conductance thermique. Les valeurs des résistances thermiques et les capacités thermiques de ces surfaces sont calculées par le modèle de ROUX [11].

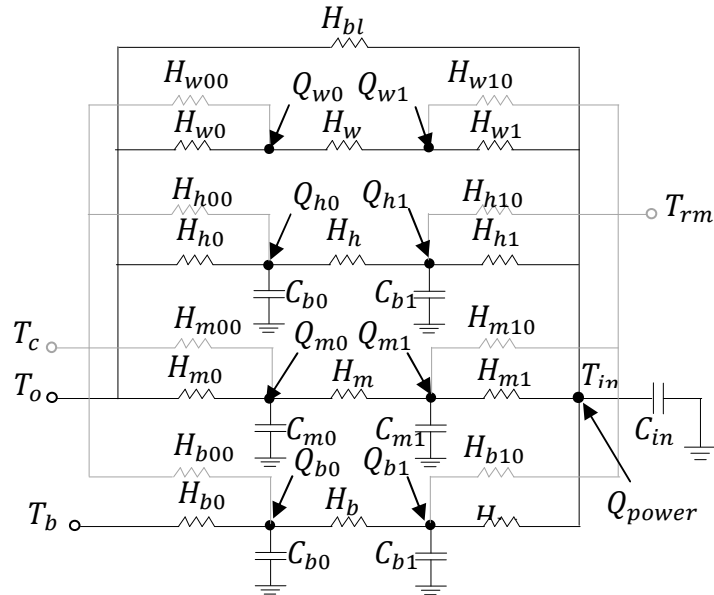


Figure 1 : Réseau résistif-capacitif du modèle thermique dynamique (MTD)

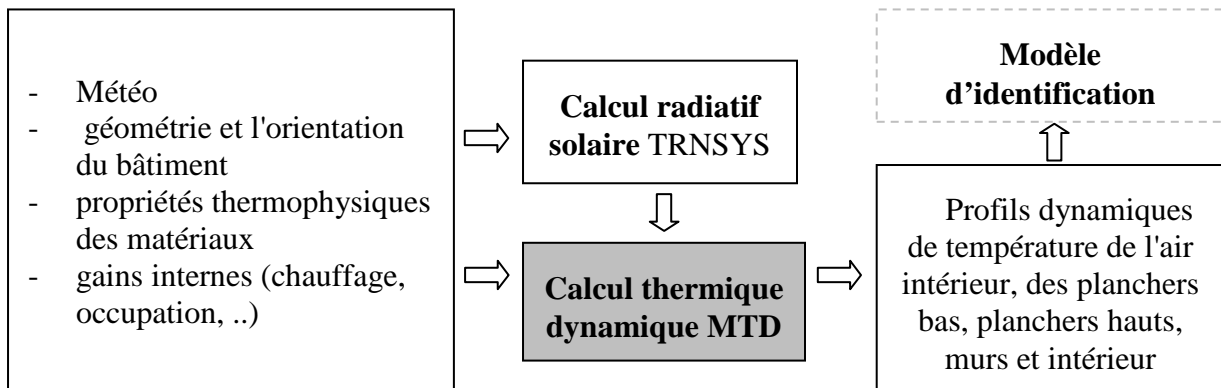


Figure 2 : Schéma du concept du modèle proposé

En appliquant la loi des nœuds (T_{in} , T_{m1} , T_{m0} , T_{h1} , T_{h0} , T_{w1} , T_{w0} , T_{b1} , T_{b0} , T_c , T_{rm}) du circuit électrique de la Figure 1, on obtient la forme générale le système d'équations (1).

$$[C] \times \frac{d[T]}{dt} = [A] \times [T] + [B] \times [M] \quad (1)$$

Avec

- [T] vecteur des températures
- [M] vecteur des sollicitations
- [C] matrice des capacités
- [A] matrice des conductances
- [B] matrice de commande

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

Les flux solaires (Q_{m1} , Q_{m0} , Q_{h1} , Q_{h0} , Q_{w1} , Q_{w0} , Q_{b1}) affectés aux différents nœuds du modèle analogique, sont calculés à partir de TRNSYS type 56 [12]. Un module de calcul des flux solaires sera disponible pour la prochaine version de ce modèle.

3. Validation de l'approche directe

La validation d'une nouvelle approche peut être réalisée par comparaison avec des résultats expérimentaux ou avec d'autres modèles numériques déjà validés. Le bâtiment de validation, a été élaboré dans le souci d'être le plus réaliste possible. Le type 56 de TRNSYS a été utilisé en monozone.

Le bâtiment considéré se compose de deux niveaux de 80 m² par niveau, pour un volume de 400 m³. Il sera testé pour deux régions en Europe. La première est située en France à La Rochelle (46,10°N 1,10°W), et la deuxième est située en Belgique à Bruxelles (50.51°N 4.20, °E). Les flux solaires affectés aux différents nœuds du modèle, sont donnés par les figures 3 et 4.

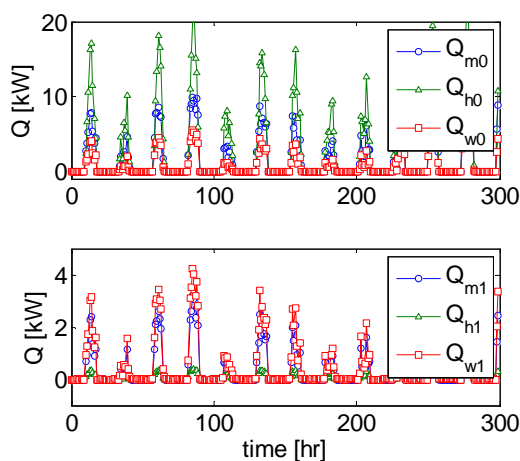


Figure 3 : Le rayonnement de la ville de La Rochelle

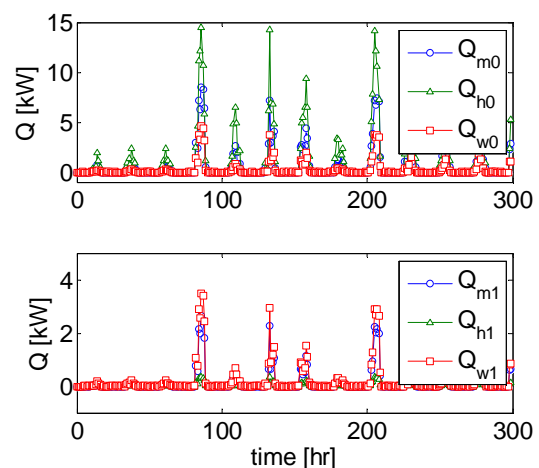


Figure 4 : Le rayonnement de la ville de Bruxelles

L'enveloppe opaque est constituée d'un mur en brique de 20 cm protégé par un enduit extérieur, d'une isolation intérieure de 12 cm en laine de verre et de plâtre de 13 mm. Le plafond possède une isolation en laine de verre à souffler de 36 cm. Le dallage est isolé en sous face par une couche de polyuréthane de 12 cm. Les données complémentaires sont données sur le Tableau 1.

Les fenêtres se répartissent sur les façades sud, est et ouest. Aucune ouverture ne se trouve sur la façade nord. Les fenêtres sont constituées de double-vitrage. Le bâtiment n'est pas chauffé, et ne possède aucune occultation. Les infiltrations d'air ne sont pas prises en compte.

Les résultats obtenus par le modèle MTD sont très concluants, puisque les profils de températures évalués par TRNSYS et par notre modèle MTD sont très proches. L'observation des résidus indique un écart maximal de 5.8°C et un écart moyen de 1.63°C sur une année. Ces écarts, relativement faibles peuvent être le résultat d'une mauvaise prise en compte d'un phénomène de transfert thermique impliquant une inertie et/ou une résistance légèrement

différente à celle calculée dans TRNSYS. Des analyses paramétriques expérimentales plus approfondies feront l'objet des futurs travaux, ce qui permettrait d'expliquer ces écarts.

		$\frac{U_i}{W. m^{-2}.K^{-1}}$	$\frac{C_{i0}}{J.K^{-1}}$	$\frac{C_{i1}}{J.K^{-1}}$
Enveloppe	Murs extérieurs ($i=m$)	0,202	$1,38 \times 10^6$	$1,38 \times 10^5$
	Plancher bas ($i=b$)	0,179	$5,51 \times 10^6$	$2,10 \times 10^6$
	Plafond ($i=h$)	0,127	1.47×10^4	$7,21 \times 10^4$
Fenêtre	U	$S(Sud)$	$S(Nord)$	$S(Est)$
	$W. m^{-2}.K^{-1}$	m^2	m^2	m^2
		1,4	25	0
				12
				12

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux.

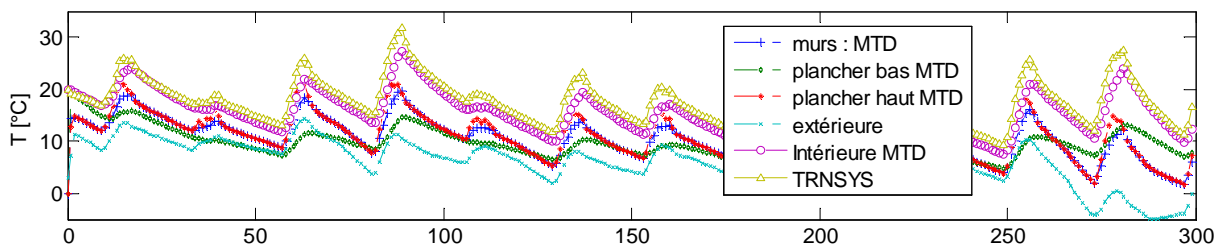


Figure 5 : Evolution dynamique des températures dans le bâtiment et comparaison avec TRNSYS pour la région de la Rochelle

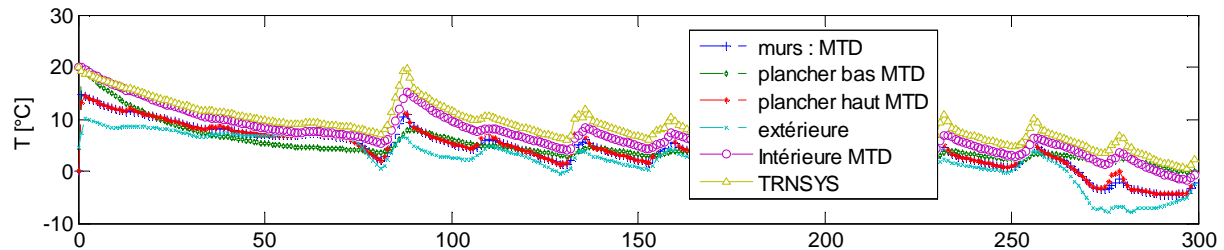


Figure 6 : Evolution dynamique des températures dans le bâtiment et comparaison avec TRNSYS pour la région de Bruxelles

4. Approche d'identification

L'évolution de la température dynamique du bâtiment est calculée en fonction des paramètres thermophysiques de ce dernier. Elle est calculée par le système matriciel (1). Pour l'optimisation, les seuls paramètres inconnus que l'on souhaite identifier sont regroupés dans un vecteur β . Ces paramètres décrivent les caractéristiques globales du bâtiment (conductances et capacités thermiques). L'objectif est de minimiser la fonction $J(\beta)$ (Eq. 2), qui correspond à l'écart quadratique entre les températures mesurées à l'intérieur du bâtiment et les températures calculées par le modèle thermique.

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

La fonction $J(\beta)$ de l'équation 2 est optimisée par l'algorithme de « Reflective Newton ». C'est un algorithme itératif appliqué aux fonctions non linéaires à plusieurs variables, sous réserve d'imposer des bornes supérieures et inférieures sur les paramètres. Chaque itération consiste à trouver une solution approchée d'un grand système linéaire en utilisant la méthode

des gradients conjugués préalablement conditionnés [13, 14]. Une méthode que nous avons utilisée avec succès sur une modélisation thermique des bâtiments par l'approche des quadripôles thermiques [15]. Toutefois, en raison du manque de stabilité et l'existence de multiples points minima dans l'espace des paramètres, mais également de l'extrême sensibilité de certains paramètres par rapport à d'autres, il est nécessaire de bien définir les conditions initiales, et d'ajuster les plages de recherches des paramètres inconnus. Cette étude se propose d'explorer l'ampleur de ces problèmes sur l'estimation des paramètres d'un bâtiment test, ou le modèle devrait offrir une approximation raisonnable.

5. Application numérique

Afin de vérifier l'efficacité de la technique proposée, avant qu'elle ne soit appliquée à des données expérimentales, une série de tests numériques ont été effectués sur le bâtiment de validation pour la région de la Rochelle, sur une période de 300 heures, les parois vitrées représentent 30 % de la surface habitable, réparties selon le tableau 1. Le problème d'identification consiste à reconstituer le vecteur inconnu β . Dans l'absence de mesures concrètes sur site, nous simulons des températures à partir de la résolution du problème direct (MTD), en rajoutant un bruit gaussien de moyenne nulle (Eq. 3).

$$T_{mes}(t) = T_{in}(t) + \xi\sigma \quad (3)$$

Pour décider du nombre de paramètres à identifier, une analyse de sensibilité sur tous les paramètres d'entrée du modèle a été effectuée. Cela va nous permettre de hiérarchiser les paramètres les plus sensibles et les plus influents du modèle, et permet d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité de la température vis-à-vis des paramètres d'entrée. L'indice de sensibilité réduit du $i^{\text{ème}}$ facteur d'entrée est défini par l'équation 4:

$$S_i(t) = X_i \frac{dT_{in}(t)}{dX_i} \quad (4)$$

Dix paramètres ont été sélectionnés pour effectuer l'analyse de sensibilité. Ces paramètres représentent les résistances et capacités thermiques de l'esquisse du bâtiment. Un indice de sensibilité réduit moyen sur toute la période de simulation est calculé pour les dix paramètres indépendamment. Les résultats des simulations sont reportés sur la figure 7.

Sur les dix paramètres étudiés, nous avons dégagé quatre paramètres ayant une réelle influence sur la température intérieure du bâtiment, qui sont la conductance thermique des planchers bas H_b , des plancher hauts H_h , des murs H_m et des vitrages H_w .

Nous avons tout d'abord essayé d'estimer β sur une base de quatre paramètres, le problème devient en effet instable. Pour rendre l'estimation possible, nous avons choisi d'estimer β sur une base de trois paramètres inconnus, les paramètres prédominants dans le cas d'une rénovation énergétique. Les paramètres sélectionnés pour l'identification sont les conductances thermiques des murs extérieurs H_m , des planchers hauts H_h et des planchers bas H_b . Les valeurs numériques de ces paramètres qui ont servi pour la résolution du problème direct sont données par le tableau 2.

Les paramètres sont initialisés à partir des valeurs initiales $\beta_0(5, 5, 5)$, et sont bornés par des limites inférieures $\beta_{\min}(1, 1, 1)$ et supérieures $\beta_{\max}(100, 100, 100)$. Le choix de ces deux limites est justifié par la connaissance approximative de la composition des parois d'un bâtiment dans le cas d'une rénovation.

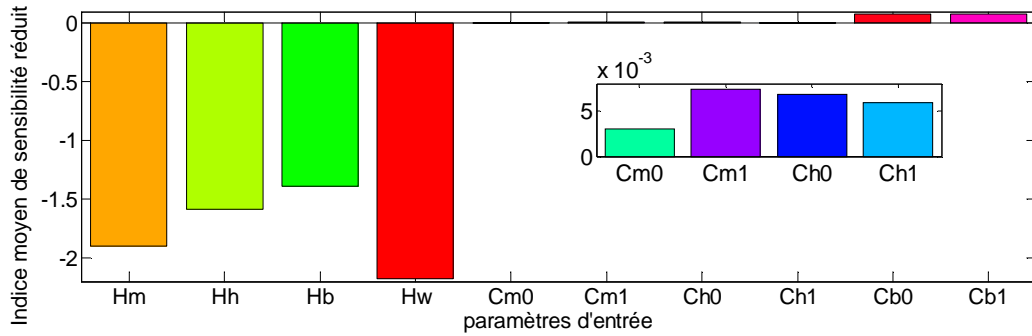


Figure 7 : Valeurs des indices de sensibilité réduit moyen

H_m	H_h	H_b
$W.K^{-1}$	$W.K^{-1}$	$W.K^{-1}$
52,9	20,34	28,68

Tableau 2 : Propriétés thermophysiques exactes à identifier.

Les résultats de l'identification des paramètres sur quatre périodes : du 01 au 08 janvier, du 01 au 08 avril, du 01 au 08 juillet et enfin du 01 au 08 octobre sont reportés sur la figure 8. Comme on pouvait s'y attendre, pour un bruit nul, les résultats de l'identification sont très proches des valeurs exactes avec une erreur nulle. Tandis que quand le bruit est de plus en plus sévère ($\sigma = 0,2$ 0,4 puis 0,6), l'identification reste acceptable pour H_m et H_b , et cela malgré le caractère oscillatoire des températures simulées. On note par ailleurs que l'écart maximal est toujours situé au niveau de l'identification de la conductance thermique des planchers hauts. Ce qui était prévisible après l'analyse de sensibilité menée sur ces différents paramètres.

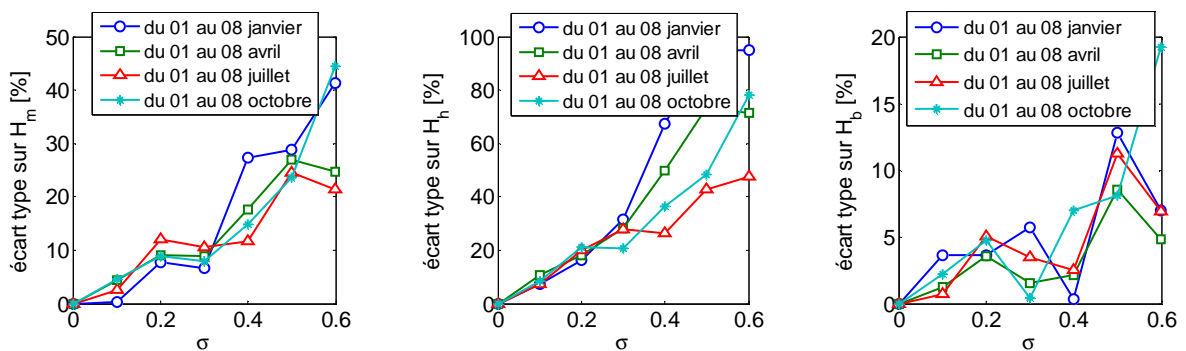


Figure 8 : Résultats de l'identification

4. Conclusion

Une nouvelle approche d'identification de paramètres thermique dédiée aux bâtiments existants a été développée et proposée dans cet article. Un modèle qui est basé sur le couplage entre un modèle thermique dynamique support, et une méthode d'identification itérative "méthode de Newton réflexive". Grâce à ce nouveau modèle, nous pouvons assez facilement identifier les paramètres thermophysiques du bâtiment. L'originalité de cette méthode est que d'une part elle s'attache à déterminer avec exactitude la performance intrinsèque du bâtiment par l'utilisation de mesures et de modélisation thermique, et d'autre part, celle-ci met en relief

les paramètres les plus influents sur l'efficacité énergétique du bâtiment. Ce module sera utilisé par les auditeurs thermiques comme un outil préalable, qui permet de donner dans un premier temps un grand degré de confiance aux caractéristiques thermophysiques de l'enveloppe, et de réaliser par la suite une meilleure optimisation de l'efficacité énergétique du bâtiment. Dans l'optique de proposer un outil plus complet aux auditeurs, une validation expérimentale est en cours de réalisation.

Références

- [1] Annamaria Buonomano, Adolfo Palombo, Building energy performance analysis by an in-house developed dynamic simulation code: An investigation for different case studies. *Applied Energy* 113 (2014) 788–807.
- [2] Seem J, Klein S, et al. Transfer functions for efficient calculation of multi-dimensional transient heat transfer. *J Heat Transfer* (1989), 5–12.
- [3] [3] Mahlia T M I, Taufiq B N Ismail, Masjuki H H. Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy and Buildings*, (2007), 39, pp. 182-187.
- [4] Comakli K, Yüksel B. Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*, (2003), 23, 473-779.
- [5] Lollinia, Barozzia, Fasanob, Meronia, Zinzib. Optimization of opaque components of the building envelope, Energy, economic and environmental issues. *Building and Environment*, (2006), 41, pp. 1001–1013.
- [6] Balaras A. The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and building*, (1996), 24, pp. 1-10.
- [7] 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.
- [8] Thomas L, McKinley. Identification of building model parameters and loads using on-site data logs. Third National Conference of IBPSA-USA, Berkeley, California, July 30 – August 1, (2008).
- [9] Sambou V, Lartigue B, Monchoux F, Adj M. Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 41, p. 1031–1036.
- [10] Roux J.J. Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments. *Thèse de Doctorat : INSA de Lyon*. (1984), 201 p.
- [11] Dam A, Virogne J, Fraisse G. Modélisation thermique d'un bâtiment monozone dans l'environnement TRNsys. *Bulletin scientifique de l'UTCB* n°3, (1997).
- [12] Coleman T F and Li Y. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds, *Mathematical Programming*, 67, 2, p. 189-224.
- [13] Coleman T F and Li Y. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *SIAM Journal on Optimization*, 6 (1996), p. 418-445.
- [14] 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, Pages 139-145.