
Recalage de modèle pour le diagnostic de performance énergétique suite à la rénovation d'un bâtiment existant : application aux chalets Sense-City

Julien Waeytens¹, Erick Merliot¹, Alexandre Nassiopoulos^{2,3}

¹ Université Paris-Est, IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, 77447 Marne-la-Vallée, mail : {julien.waeytens,erick.merliot}@ifsttar.fr

² LUNAM Université, IFSTTAR, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais, mail : alexandre.nassiopoulos@ifsttar.fr

³ ECOTROPY, Campus IFSTTAR, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais, mail : a.nassiopoulos@ecotropy.fr

RÉSUMÉ. Face à un faible flux de construction neuve en France, d'importantes économies d'énergie peuvent être réalisées par la rénovation des bâtiments existants. Une stratégie numérique fondée sur la modélisation inverse, i.e. interaction entre modèle thermique de bâtiment et mesures, est développée afin de réaliser un bilan énergétique détaillé d'un bâtiment existant avant et après rénovation. La première étape consiste à recalibrer les paramètres du modèle thermique à partir de mesures in-situ par un algorithme itératif. Ensuite, ce modèle recalibré est exploité pour estimer l'ensemble des flux énergétiques. Cette stratégie est appliquée aux chalets de l'EquipEx Sense-City. Les échanges convectifs entre la paroi et l'extérieur ont été réduits de 75% suite à l'ajout d'un isolant.

ABSTRACT. In France, the flow of new construction represents between 1 and 2 % of the real estate. To massively reduce the energy consumption, existing buildings have to be renovated. We propose a numerical tool based on inverse model, i.e. combination of thermal building model and sensor outputs, to estimate the energy efficiency of a building before and after renovation. Firstly, thermal building parameters are updated using an iterative algorithm. Then, the updated model allows to evaluate all the energy flows. This numerical strategy is applied to the chalets of French Excellence Equipment "Sense-City". It shows that the convective exchanges between the envelop and the outside are reduced by 75% when adding an insulator.

MOTS-CLÉS : Efficacité énergétique, Simulation énergétique dynamique, Recalage de modèle, Smart-City

KEYWORDS: Energy efficiency, Dynamic energy simulation, Model updating, Smart-City

1. Introduction

En France, le flux de construction neuve de bâtiments est très faible. Il représente 1 à 2% du parc immobilier. La consommation moyenne d'énergie de ces bâtiments est de $240 \text{ kWh EP/m}^2/\text{an}$ (source ADEME). Ceci correspond à la note E du diagnostic de performance énergétique. Ainsi, d'importantes économies d'énergie peuvent être réalisées par la rénovation des bâtiments existants.

Nous nous intéressons à la réalisation d'un bilan énergétique détaillé avant et après rénovation. L'objectif est de quantifier les gains énergétiques réalisés suite à une opération de rénovation. Les stratégies classiques d'audit énergétique, notamment la TH-C-E ex, sont des méthodes forfaitaires. Elles permettent d'avoir une première estimation de l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment. Néanmoins, ces méthodes forfaitaires ne prenant pas en compte des mesures in-situ, des écarts importants peuvent être observés entre le bilan énergétique estimé et le bilan énergétique réel.

Dans cet article, nous proposons une stratégie numérique, fondée sur la modélisation inverse, afin de réaliser un bilan énergétique détaillé du bâtiment suite à une rénovation. La modélisation inverse en thermique du bâtiment a été précédemment utilisée dans [NAS 14b, NAS 14a, CHA 14, NAS 13]. La première étape consiste à recalibrer les paramètres du modèle thermique à partir de mesures in-situ. Le modèle recalibré est ensuite exploité afin de réaliser un bilan énergétique détaillé. Dans la Section 2, nous décrivons le cas d'étude à savoir les chalets de l'EquipEx Sense-City [DER 12]. La modélisation thermique est traitée dans la Section 3. Ensuite, la méthode numérique pour le recalage du modèle est présentée dans la Section 4. Enfin, le bilan énergétique détaillé pour les deux chalets est réalisé dans la Section 5 à l'aide des modèles recalés.

2. Description des chalets de l'EquipEx Sense-City

L'objet de l'étude concerne le comportement thermique des deux chalets de l'EquipEx Sense-City [DER 12]. Le premier chalet de l'EquipEx considéré "sans rénovation" présente une enveloppe uniquement constituée d'une épaisseur de 44mm de bois (pin). Le second chalet est identique au premier excepté que son enveloppe présente 44mm de pin, 40mm de polystyrène et 10mm de plâtre. Le second chalet représente le chalet "après rénovation". Les deux chalets d'une surface d'environ 20m^2 ont la même géométrie et ils sont implantés sur le même site (voir Figure 1).



Figure 1. Chalets de l'EquipEx Sense-City

Les deux chalets sont comparés sur une période de 7 jours du 14 décembre 2015 au 21 décembre 2015. La température dans chacun des chalets ainsi que la température extérieure ont été mesurées avec un pas temporel de 2 minutes. Le flux solaire est une donnée fournie par Météo France. Durant cette période, le chauffage a été allumé dans les deux chalets à 800W du 14 décembre 2015 à 10 :15 au 16 décembre 2015 à 8h15.

3. Modèle thermique des chalets

Les chalets sont modélisés à l'aide d'un modèle mono-zone avec une enveloppe. Dans un premier temps, les échanges thermiques au niveau de la toiture et du sol sont négligés. Ce modèle a été précédemment utilisé dans [NAS 14b].

La température dans la zone, notée $T(t)$, est supposé homogène. La température dans l'enveloppe est notée $\theta(x, t)$. $\theta(x = 0, t)$ (resp. $\theta(x = L_e, t)$) est associée à la température à la surface de la paroi intérieure (resp. paroi extérieure) du chalet. Le couple (T, θ) vérifie le système d'équations différentielles ci-dessous.

Dans la zone :

$$C \frac{dT}{dt}(t) = \Gamma_0 s \Phi(t) + C_a R (T_{ext}(t) - T(t)) + h S_e (\theta(x = 0, t) - T(t)) + W(t), \quad t \in [0, \tau] \quad [1]$$

$$T(t = 0) = T_{t=0} \quad [2]$$

- τ : temps d'étude (s)
- C : capacité thermique globale de la zone (JK^{-1})
- $\Gamma_0 s \Phi(t)$: flux solaire entrant dans la zone (W), c'est une donnée Météo France.
- C_a : capacité thermique volumique de l'air ($JK^{-1}m^{-3}$)
- R : débit d'air de la ventilation (m^3/s)
- T_{ext} : température extérieure ($^{\circ}C$), c'est une donnée.
- $h S_e$: produit du coefficient d'échange ($WK^{-1}m^{-2}$) avec la surface de l'enveloppe (m^2)
- W : apport de chaleur par le chauffage (W)
- $T_{t=0}$: température initiale dans la zone ($^{\circ}C$)

Dans l'enveloppe :

$$c_w S_e \frac{\partial \theta}{\partial t}(x, t) - k_w S_e \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0, \quad x \in [0, L_e], \quad t \in [0, \tau] \quad [3]$$

$$k_w S_e \frac{\partial \theta}{\partial x}(x = 0, t) = h S_e (\theta(x = 0, t) - T(t)), \quad t \in [0, \tau] \quad [4]$$

$$-k_w S_e \frac{\partial \theta}{\partial x}(x = L_e, t) = h S_e (\theta(x = L_e, t) - T_{ext}(t)), \quad t \in [0, \tau] \quad [5]$$

$$\theta(x, t = 0) = \theta_{t=0}(x), \quad x \in [0, L_e] \quad [6]$$

- $c_w S_e$: produit de la capacité thermique volumique globale de l'enveloppe ($JK^{-1}m^{-3}$) avec la surface d'échange de l'enveloppe (m^2)

- $k_w S_e$: produit de la conductivité thermique globale de l'enveloppe ($WK^{-1}m^{-1}$) avec la surface d'échange de l'enveloppe (m^2)

- $h S_e$: produit du coefficient d'échange ($WK^{-1}m^{-2}$) avec la surface de l'enveloppe (m^2)

- $\theta_{t=0}$: température initiale dans l'enveloppe ($^{\circ}C$)

Le système d'équations différentielles ci-dessus est résolu par la méthode des éléments finis en espace et le schéma Euler implicite en temps. L'enveloppe est discrétisée spatialement avec 10 éléments. Le pas temporel pour la résolution numérique est de 120s.

4. Stratégie pour le recalage du modèle thermique

Afin que le modèle thermique soit représentatif de la réalité, il est nécessaire de recalibrer les paramètres du modèle. Ainsi, on note \mathbf{p} le vecteur des paramètres du modèle à recalibrer. Le vecteur initial des paramètres (avant

recalage) est noté \mathbf{p}_0 . Le recalage des paramètres du modèle est effectué automatiquement par la minimisation d'une fonctionnelle J d'écart quadratique entre la température simulée et la température mesurée dans la zone :

$$J(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{t=\tau} (T(t; \mathbf{p}) - T^{mes}(t))^2 dt + \alpha_{reg} \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_0\|^2 \quad [7]$$

Ce problème inverse étant généralement mal-posé, on restreint le nombre de paramètres à recalcer et on considère un terme de régularisation de Tikhonov [TIK 77] dans la fonctionnelle à minimiser (second terme dans Equation (7)). Le paramètre de régularisation α_{reg} est choisi afin de vérifier le principe de discrétance initialement introduit dans [MOR 66].

Un algorithme itératif de type gradient est mis en œuvre pour minimiser la fonctionnelle. Le calcul du gradient est effectué à moindre coût grâce à l'état adjoint. Le processus de recalage s'arrête lorsque la modification des paramètres est inférieure à 0,1% entre deux itérations.

L'état adjoint est également utilisé pour évaluer la sensibilité de la fonctionnelle J aux paramètres du modèle. Seuls les paramètres les plus sensibles et les plus incertains sont recalés.

Pour le chalet considéré "sans rénovation" les valeurs numériques estimées (sans recalage) des paramètres du modèle sont données dans le Tableau 2. Afin d'avoir une température simulée représentative de la réalité, le modèle est recalé. Du fait de la présence d'un unique capteur de température présent dans la zone, on ne recalé pas l'ensemble des paramètres. Le débit de ventilation R de $160 \text{ m}^3/\text{h}$ ayant été vérifié suite à des mesures aérauliques, ce paramètre n'est pas recalé. Ensuite, afin de classer les paramètres du modèle du plus au moins influant, pour chaque paramètre on introduit un indicateur local de sensibilité :

$$\delta_{\bar{C}} = \frac{|\frac{\partial J}{\partial \bar{C}}(\mathbf{p}_0)|}{\|\frac{\partial J}{\partial \bar{\mathbf{p}}}(\mathbf{p}_0)\|}; \delta_{h\bar{S}_e} = \frac{|\frac{\partial J}{\partial h\bar{S}_e}(\mathbf{p}_0)|}{\|\frac{\partial J}{\partial \bar{\mathbf{p}}}(\mathbf{p}_0)\|}; \delta_{c_w\bar{S}_e} = \frac{|\frac{\partial J}{\partial c_w\bar{S}_e}(\mathbf{p}_0)|}{\|\frac{\partial J}{\partial \bar{\mathbf{p}}}(\mathbf{p}_0)\|}; \delta_{k_w\bar{S}_e} = \frac{|\frac{\partial J}{\partial k_w\bar{S}_e}(\mathbf{p}_0)|}{\|\frac{\partial J}{\partial \bar{\mathbf{p}}}(\mathbf{p}_0)\|} \quad [8]$$

où $\bar{\mathbf{p}}$ désignent les paramètres adimensionnés définis par $\mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}}\mathbf{p}_0$. Le calcul des indicateurs de sensibilité, réalisé à l'aide de l'état adjoint, sont synthétisés dans le Tableau 1. Les résultats montrent que le paramètre de capacité thermique globale de la zone est peu sensible devant les autres paramètres. Ainsi, seuls les paramètres (hS_e, c_wS_e, k_wS_e) sont recalés.

Tableau 1. Valeurs numériques des indicateurs de sensibilité associés aux paramètres du modèle thermique du chalet "sans rénovation"

$\delta_{\bar{C}}$	$\delta_{h\bar{S}_e}$	$\delta_{c_w\bar{S}_e}$	$\delta_{k_w\bar{S}_e}$
$5,5 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-3}$	1

Enfin, les valeurs numériques des paramètres obtenues après le processus de recalage sont donnés dans le Tableau 2. On constate que seule la conductivité thermique dans l'enveloppe a été diminuée de 20%. La température simulée avec les paramètres recalés est représentée sur la Figure 2.

Tableau 2. Valeurs numériques des paramètres avant et après recalage pour le chalet "sans rénovation" - Le symbole "NR" signifie paramètre non recalé du fait de leur faible sensibilité ou de leur faible incertitude

	C (J/K)	CaR (J/(K.s))	hS_e (W/K)	c_wS_e (J/(K.m))	k_wS_e (J/(K.m))
Avant recalage	$4,48 \times 10^4$	53,3	350	$2,98 \times 10^7$	4,9
Après recalage	NR	NR	350	$2,98 \times 10^7$	3,9

De manière analogue, les paramètres du modèle associés au chalet "après rénovation" sont recalés à partir de la température mesurée dans la zone. On obtient les valeurs numériques suivantes :

$$C = 4,48 \text{ J/K}; CaR = 53,3 \text{ J/(K.s)}; hS_e = 350 \text{ W/K}; c_wS_e = 4,22 \times 10^7 \text{ J/(K.m)}; k_wS_e = 1,64 \text{ J/(K.m)} \quad [9]$$

La température simulée avec les paramètres recalés dans le chalet "après rénovation" est représentée sur la Figure 3.

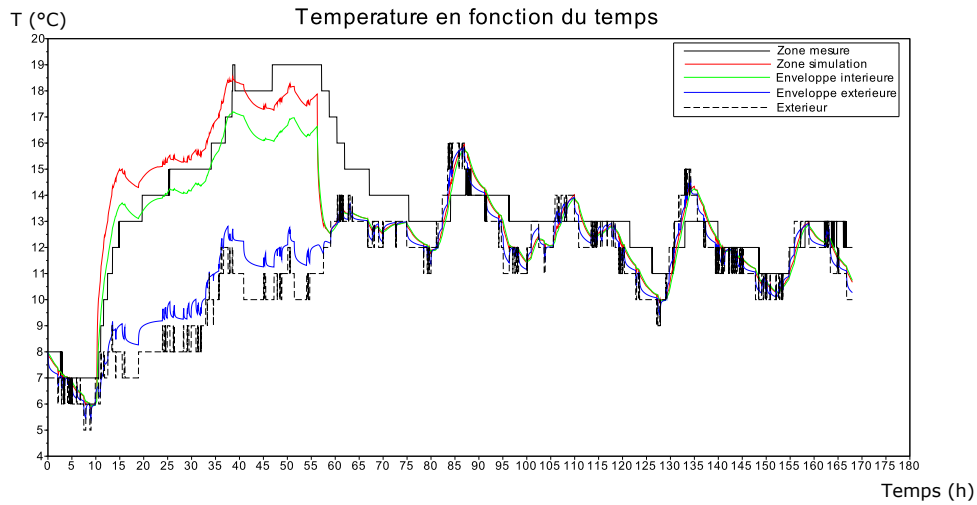


Figure 2. Représentation de la température simulée après recalage du modèle et de la température mesurée dans le chalet “sans rénovation”.

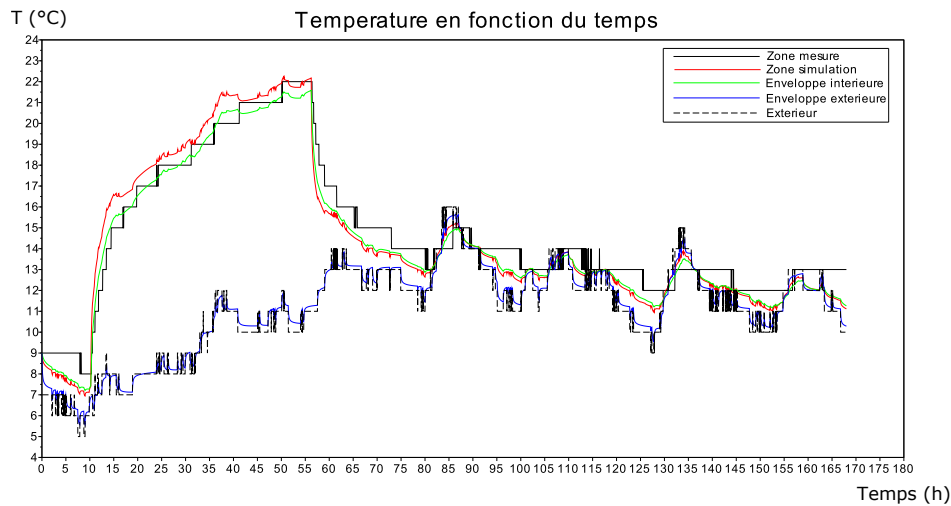


Figure 3. Représentation de la température simulée après recalage du modèle et de la température mesurée dans le chalet “après rénovation”.

5. Bilan énergétique détaillé à l’aide du modèle recalé

Les modèles thermiques recalés sont utilisés pour réaliser un bilan énergétique détaillé des chalets. L’objectif est de quantifier le gain énergétique apporté suite à une opération de rénovation. Les bilans énergétiques, réalisés sur la période d’étude du 16 au 21 décembre 2015, pour le chalet “sans rénovation” et le chalet “après rénovation” sont représentés sur la Figure 4. Par exemple, la quantité d’énergie stockée dans l’enveloppe et la perte énergétique due à la ventilation sont obtenues par :

$$E_{\text{enveloppe stockee}} = \int_{t=0}^{t=\tau} \int_{x=0}^{x=L_e} c_w S_e \frac{\partial \theta}{\partial t}(x, t) dx dt \quad [10]$$

$$E_{\text{perte ventilation}} = \int_{t=0}^{t=\tau} C_a R (T(t) - T_{\text{ext}}(t)) dt \quad [11]$$

On rappelle que $T(t)$ et $\theta(x, t)$ représentent les températures simulées dans la zone et dans l'enveloppe après recalage des paramètres du modèle. Les autres énergies représentées sur la Figure 4 sont obtenues de manière analogue.

Cette étude comparative ayant été réalisée sur une période d'étude donnée et pour un scénario de chauffage donné, l'apport énergétique (solaire et chauffage) dans la zone est identique pour les deux chalets. L'ajout d'un isolant dans le second chalet a permis de réduire de 75% les échanges convectifs entre la paroi et l'extérieur. Dans ce chalet après rénovation, les pertes énergétiques prédominantes sont associées à la ventilation. Ceci est due à la sur-ventilation de $160m^3/h$ présente dans les chalets pour des applications de recherche en qualité de l'air intérieur.

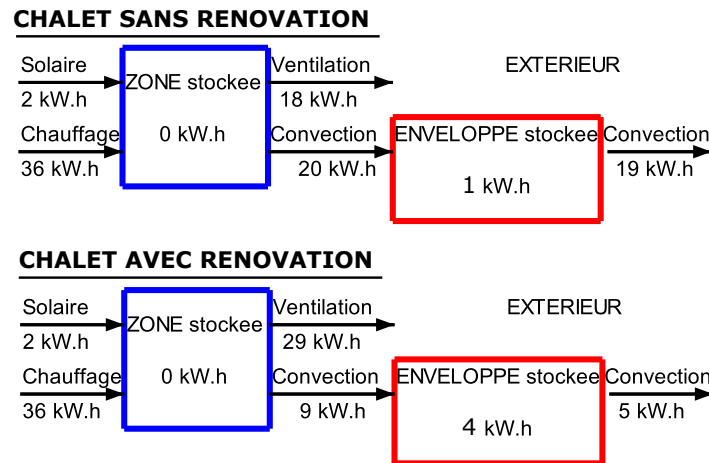


Figure 4. Bilan énergétique pour le chalet “sans rénovation” (en haut) et pour le chalet “avec rénovation” (en bas)

6. Conclusions et Perspectives

Une stratégie numérique fondée sur la modélisation inverse (mesure et modèle) a été développée afin de réaliser un bilan énergétique détaillé d'un bâtiment existant et de quantifier le gain énergétique apporté suite à une opération de rénovation. La première étape consiste à recalculer les paramètres du modèle par la minimisation d'une fonctionnelle d'écart quadratique entre simulation et mesure. Le modèle recalculé est ensuite exploité pour calculer l'ensemble des flux énergétiques. Concernant les chalets Sense-City, notre outil numérique a estimé une réduction de 75% des échanges convectifs entre la paroi et l'extérieur suite à l'ajout d'un isolant.

D'importantes économies d'énergie peuvent être réalisées par la rénovation du bâtiment existant. Néanmoins, le pilotage optimal des équipements du bâtiment est une action complémentaire à mener. L'objectif par la suite sera d'exploiter le modèle recalculé de thermique afin de prédire le comportement thermique du bâtiment et d'en déduire un pilotage optimal du chauffage et de la ventilation.

Remerciements

L'Équipement d'Excellence Sense-City a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du “Programme d'Investissement d'Avenir”. Le numéro de référence associé est ANR-10-EQPX-48.

Bibliographie

7. Bibliographie

- [CHA 14] CHAMOIN L., LADEVÈZE P., WAEYSENS J., « Goal-oriented updating of mechanical models using the adjoint framework », *Computational Mechanics*, vol. 54, p. 1415–1430, 2014.
- [DER 12] DERKX F., LEBENTAL B., BOUROUINA T., BOURQUIN F., COJOCARU C.-S., ROBINE E., VAN DAMME H., « The Sense-City project », *XVIIIth Symposium on Vibrations, Shocks and Noise*, 2012.

- [MOR 66] MOROZOV V. A., « On the solution of functional equations by the method of regularization », *Soviet Math. Dokl.*, vol. 7, p. 414-417, 1966.
- [NAS 13] NASSIOPOULOS A., BOURQUIN F., « On-site building walls characterization », *Numerical heat transfer, Part A-Applications*, p. 1415–1430, 2013.
- [NAS 14a] NASSIOPOULOS A., BROUNS J., ARTIGES N., SMAIL M., AZEROU B., « ReTroFIT : A Software to Solve Optimization and Identification Problems Applied to Building Energy Management », *EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. Nantes, France*, 2014.
- [NAS 14b] NASSIOPOULOS A., KUATE R., BOURQUIN F., « Calibration of building thermal models using an optimal control approach », *Energy & Buildings*, vol. 76, p. 81–91, 2014.
- [TIK 77] TIKHONOV A., ARSEININ Y., *Solutions to ill-posed problems*, Wintson-Widley, New York, 1977.