

Recalage de modèle vis-à-vis d'une quantité d'intérêt en thermique du bâtiment – Applications dans l'équipement Sense-City

Julien Waeytens^{*1}, Zohra Djatouti¹, Patrice Chatellier¹, Ludovic Chamoin²

¹ Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR

14-20 bd Newton 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

² Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMT

4 av des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

*julien.waeytens@univ-eiffel.fr

RESUME. L'objet de ce travail concerne une méthode inverse d'identification de paramètres de modèle vis-à-vis d'une quantité d'intérêt et le positionnement optimal de capteurs en thermique du bâtiment. Contrairement aux méthodes inverses standards telles que la méthode de régularisation de Tikhonov, l'approche proposée est formulée pour l'amélioration de la prédiction de quantités d'intérêt. Seuls les paramètres auxquels celles-ci sont sensibles sont automatiquement mis à jour. La méthode inverse est appliquée à des mesures réelles issues de l'instrumentation d'un bâtiment de l'équipement d'excellence "Sense-City" sous un climat hivernal. D'une part, les résultats obtenus montrent que la méthode proposée n'identifie que les paramètres auxquels la quantité d'intérêt est la plus sensible. D'autre part, on montre que la quantité d'intérêt peut être correctement estimée en réduisant fortement l'instrumentation.

MOTS-CLÉS. problèmes inverses, quantité d'intérêt, Sense-City.

ABSTRACT. A goal-oriented inverse method for model parameter identification and an optimal sensor placement strategy are developed for thermal building problems. Unlike the standard global inverse approaches such as Tikhonov regularization method, the goal-oriented inverse method is formulated for a robust prediction of a quantity of interest. Thus, it only and automatically updates the model parameters that most affect the computation of the sought quantity of interest. The proposed identification strategy is applied to a building which is part of the "Sense-City" equipment under a winter climate scenario. The results show that the goal-oriented inverse method robustly predicts the sought quantity of interest by only updating the model parameters to which it is sensitive. Moreover, we observe that the quantity of interest can be accurately estimated using a decreased amount of sensors.

KEYWORDS. inverse problems, quantity of interest, Sense-City.

1 INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de dérèglement climatique et d'épuisement des ressources, la réduction des consommations énergétiques finales du secteur résidentiel/tertiaire représente un enjeu majeur. En France, ce secteur compte pour environ 45% des consommations énergétiques finales.

De plus, le parc immobilier français est constitué majoritairement de bâtiments anciens et énergivores et son taux de renouvellement annuel est très faible (1% à 2%), raisons pour lesquelles les bâtiments existants représentent un important gisement d'économies d'énergie. Le couplage des simulations thermiques dynamiques et des mesures in situ est une piste prometteuse pour un diagnostic énergétique réaliste du bâtiment et son pilotage via des stratégies de contrôle optimal. En pratique, des méthodes normalisées (AFNOR, 2014) sont très souvent employées mais elles présentent de fortes limitations du fait des hypothèses simplificatrices considérées. Dans la littérature, de nombreux travaux traitent de la résolution de problèmes inverses pour l'identification des caractéristiques thermiques à l'échelle de la paroi ou du bâtiment par des approches déterministes (Beck et al., 1985; Alzetto et al., 2018; Nassiopoulos et al., 2014; Ha et al., 2020) ou des approches probabilistes (Berger et al., 2016; Thébault et Bouchié, 2018; Rouchier, 2018; Ha et al., 2020). Le nombre de paramètres des modèles de thermique du bâtiment étant généralement bien supérieur au nombre de capteurs déployés, le problème inverse d'identification de paramètres peut s'avérer mal posé.

Dans ce travail, nous proposons une stratégie numérique pour le recalage de paramètres dans le but de prédire précisément une quantité d'intérêt en thermique du bâtiment (Djatouti et al., 2020a,b). Contrairement aux méthodes usuelles, l'objectif n'est pas de reproduire le comportement thermique global du bâtiment en recalant l'ensemble des paramètres. La méthode inverse proposée intègre un outil d'analyse de sensibilité afin de sélectionner et d'ajuster uniquement les paramètres les plus influents vis-à-vis de la quantité d'intérêt choisie. Cette analyse de sensibilité permet également d'optimiser l'instrumentation en sélectionnant les capteurs les plus pertinents. La méthode inverse vis-à-vis d'une quantité d'intérêt a été testée sur un bâtiment R+1 instrumenté de l'équipement Sense-City (Derckx et al., 2012) en considérant un modèle multizone. Grâce à la chambre climatique Sense-City, la méthode inverse a été appliquée à différents scénarios de climat et d'occupation programmés dans Sense-City, notamment un climat hivernal de Carpentras et la canicule parisienne d'août 2003 (Djatouti et al., 2020c). Seul l'essai en climat hivernal est présenté dans cet article.

2 MÉTHODE DE RECALAGE VIS-À-VIS D'UNE QUANTITÉ D'INTÉRÊT ET SÉLECTION OPTIMALE DES CAPTEURS

La méthode de recalage vis-à-vis d'une quantité d'intérêt s'appuie sur le formalisme de l'erreur en relation de comportement introduit dans le domaine de la mécanique (Chouaki et al., 1996). La méthode inverse étudiée permet de recaler uniquement les paramètres du modèle permettant de prédire de façon précise une quantité d'intérêt donnée. Cette approche a également pour but de limiter le nombre de capteurs et de réduire les temps de calculs. Après avoir choisi la quantité d'intérêt Q , le problème consiste à minimiser une fonction coût J_Q correspondant à l'écart entre la quantité d'intérêt Q_1 calculée à partir de la solution numérique T_1 du modèle de thermique

$$\mathbb{C}\dot{\mathbf{T}}_1 + \mathbb{K}\mathbf{T}_1 = \mathbf{F}, \quad \mathbf{T}_1(t=0) = \mathbf{T}_0 \quad (1)$$

et la quantité d'intérêt Q_2 calculée à partir d'un champ de température T_2 obtenu par l'extrapolation des mesures via le modèle thermique

$$\begin{bmatrix} \mathbb{C} & \mathbb{O} \\ \mathbb{O} & \mathbb{C} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{T}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbb{K} & \frac{1}{\tau}\mathbb{C} + \mathbb{K} \\ \alpha\mathbf{\Pi}^T\mathbb{G}\mathbf{\Pi} & -\mathbb{K} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_2 \\ \boldsymbol{\lambda}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \alpha\mathbf{\Pi}^T\mathbb{G}\mathbf{T}_{mes} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_2(t=0) = \mathbf{T}_0, \quad \boldsymbol{\lambda}_2(t_f=0) = \mathbf{0}$$

où α est un coefficient de pondération entre mesure et simulation, τ est un temps caractéristique, \mathbf{T}_{mes} représente les mesures de température, $\mathbf{\Pi}$ est un opérateur d'extraction permettant d'obtenir la quantité d'intérêt à partir de la température \mathbf{T} et \mathbb{G} est une matrice diagonale. En pratique, il est important de noter que la quantité d'intérêt n'est pas toujours mesurée. Ainsi,

notre méthode inverse permet une estimation de la quantité d'intérêt par une extrapolation des mesures existantes. La fonction coût J_Q , associée au problème de recalage vis-à-vis d'une quantité d'intérêt, est définie par

$$\mathcal{J}_Q(\mathbf{T}, \mathbf{p}) = \frac{1}{2}r [Q_1(\mathbf{T}_1(\mathbf{p})) - Q_2(\mathbf{T}_2(\mathbf{p}))]^2 \quad (3)$$

où \mathbf{p} représente les paramètres du modèle et $r = \alpha/(1 + \alpha)$.

Afin de résoudre ce problème de minimisation, une méthode de descente est utilisée. Le gradient de la fonctionnelle est calculé à l'aide de l'état adjoint.

De plus, ce formalisme est également utilisé pour sélectionner l'instrumentation nécessaire dans le but de prédire une quantité d'intérêt donnée. Pour cela, on exploite le problème couplé (2) définissant le champ de température T_2 couplant mesure et modèle physique. En s'inspirant des travaux de (Becker et Rannacher, 2001), on réécrit la quantité d'intérêt Q_2 sous la forme d'un problème de minimisation sous contraintes pour obtenir l'expression de la sensibilité de la quantité d'intérêt aux mesures. Ainsi, on introduit le Lagrangien :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_Q = Q_2(\mathbf{T}_2) - \int_0^{t_f} \boldsymbol{\Lambda}_2^T \left[\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}}_2 + \mathbb{K}\mathbf{T}_2 + \left(\frac{1}{\tau}\mathbf{C} + \mathbb{K} \right) \boldsymbol{\lambda}_2 - \mathbf{F} \right] dt \\ - \int_0^{t_f} \boldsymbol{\gamma}_2^T \left[\mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\lambda}}_2 + \alpha\boldsymbol{\Pi}^T\mathbb{G}\boldsymbol{\Pi}\mathbf{T}_2 - \mathbb{K}\boldsymbol{\lambda}_2 - \alpha\boldsymbol{\Pi}^T\mathbb{G}\mathbf{T}_{mes} \right] dt \end{aligned} \quad (4)$$

L'écriture du point-selle du Lagrangien permet d'obtenir le second problème couplé suivant :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \dot{\boldsymbol{\gamma}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\Lambda}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbb{K} & -\frac{1}{\tau}\mathbf{C} - \mathbb{K} \\ -\alpha\boldsymbol{\Pi}^T\mathbb{G}\boldsymbol{\Pi} & -\mathbb{K} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\gamma}_2 \\ \boldsymbol{\Lambda}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_Q \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_2(t=0) = \mathbf{0}, \boldsymbol{\Lambda}_2(t=t_f) = \mathbf{0}$$

où \mathbf{F}_Q est un vecteur de force nodale associé à la fonction $F_Q(x, t)$ définie par :

$$F_Q(x, t) = -\frac{\partial Q}{\partial T} \quad (6)$$

La sensibilité de la quantité d'intérêt aux mesures peut alors se calculer par

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \mathbf{T}_{mes}} \delta \mathbf{T}_{mes} = \frac{\partial \mathcal{L}_Q}{\partial \mathbf{T}_{mes}} \delta \mathbf{T}_{mes} = \alpha \int_0^{t_f} \boldsymbol{\gamma}_2^T \boldsymbol{\Pi}^T \mathbb{G} \delta \mathbf{T}_{mes} dt \quad (7)$$

La solution $\boldsymbol{\gamma}_2$ du problème couplé (5) permet donc de déterminer les positions pertinentes de capteurs pour la prédiction de la quantité d'intérêt. Pour une description détaillée de la méthode, le lecteur pourra se référer à (Djatouti et al., 2020a).

3 APPLICATION SUR UN BÂTIMENT R+1 DANS L'ÉQUIPEMENT SENSE-CITY

3.1 DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION

Les essais ont été conduits sur le bâtiment R+1 de l'équipement Sense-City représenté sur la fig.1. Cet équipement dispose d'une chambre climatique sur rail afin de se déplacer sur un des deux petits quartiers d'une surface de $400m^2$. Ceci permet de reproduire de façon contrôlée différents climats sur une large plage de température (-10° ; $40^\circ C$) et d'humidité (20% ; 95%).

Le premier petit quartier instrumenté dispose d'un bâtiment R+1 (objet de l'étude), un chalet en bois et une maisonnette en matériau bio-sourcée le tout entouré d'une route et d'équipements urbains. Le bâtiment, d'une surface au sol de $40m^2$ et d'une hauteur totale de $6m$, comporte deux étages. Le rez de chaussée (resp. l'étage) est composé de 5 pièces (resp. un open-space). L'enveloppe du bâtiment est constitué d'éléments préfabriqués en béton armé de $20cm$ d'épaisseur.

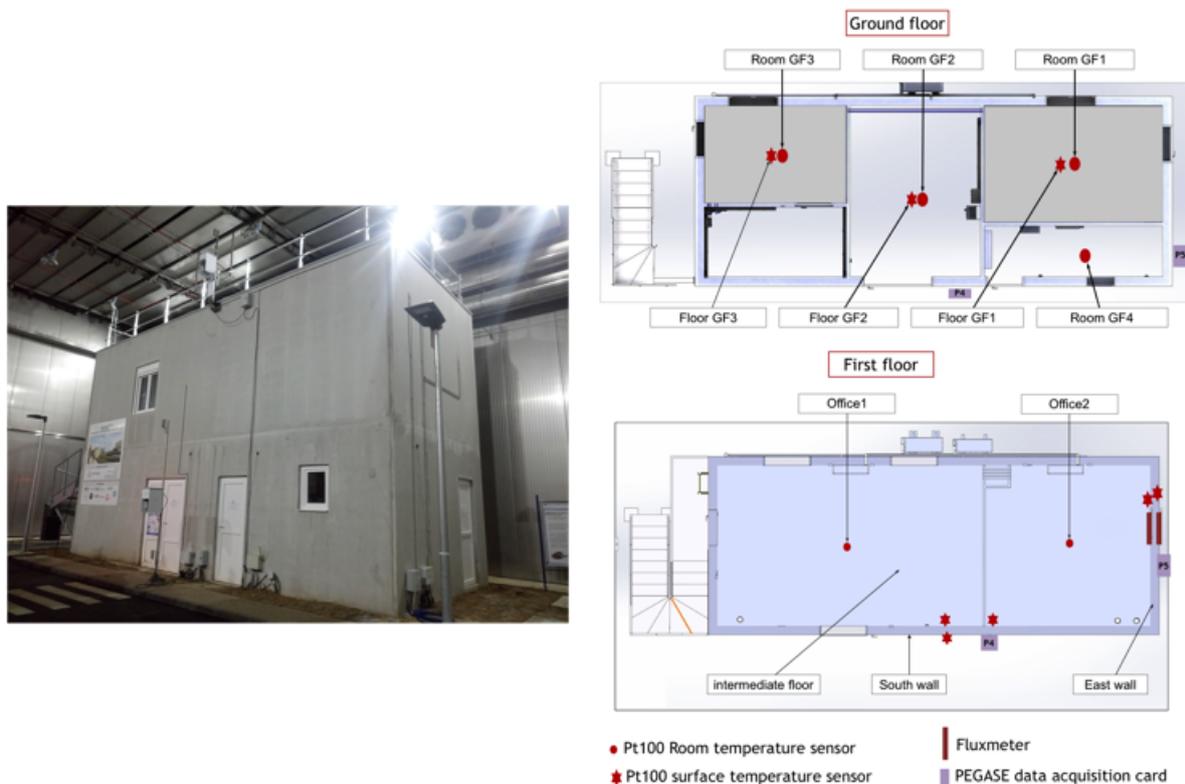


FIGURE 1. Photo du bâtiment R+1 dans la chambre climatique Sense-City (à gauche) et position des capteurs de température et de flux sur les deux étages du bâtiment (à droite)

Concernant l'instrumentation, nous avons disposé :

- des capteurs de températures de type PT100 dans les pièces et à la surface des parois internes et externes du bâtiment ;
- des capteurs de flux sur les faces intérieure et extérieure de la paroi orientée Est ;
- des prises connectées mesurant la puissance consommée par les radiateurs électriques ;
- une station météo à l'extérieur sur le toit du bâtiment.

Le placement des capteurs est illustré sur la fig.1. Il est important de noter que les capteurs de température ont été utilisés dans la procédure d'inversion alors que les capteurs de flux ont été exploités afin de valider les résultats numériques issus de la méthode inverse proposée.

Dans un premier temps un essai de thermique stationnaire, *i.e* température constante à $20^{\circ}C$ dans le bâtiment et température extérieure constante à $5^{\circ}C$, a été réalisé dans Sense-City afin de déterminer expérimentalement par une méthode normalisée les caractéristiques thermique du bâtiment. On a ainsi estimé la conductivité thermique des murs en béton armé à $0,87W/(m.K)$, le coefficient d'échange surfacique global intérieur à $2,1W/(K.m^2)$ et le coefficient d'échange surfacique global extérieur à $6,7W/(K.m^2)$. Dans un second temps, le comportement thermique dynamique du bâtiment a été étudié sous un climat simplifié hivernal de Carpentras issu de la RT2012. Durant cet essai, la VMC du bâtiment était en fonctionnement. Les chauffages ont été allumés suivant un scénario d'occupation à l'étage. Au rez de chaussée, les chauffages étaient

en mode “hors-gel”. Une partie des températures mesurées durant l’essai sont représentées sur la fig.2. La température moyenne de l’étage T_{ff}^{mes} (resp. de l’ensemble du rez de chaussée) a été obtenue par une moyenne (resp. moyenne pondérée) des 2 capteurs présents (resp. des 4 capteurs présents) dans celui-ci.

3.2 RÉSULTATS DU RECALAGE VIS-À-VIS D’UNE QUANTITÉ D’INTÉRÊT

Pour décrire le comportement thermique du bâtiment, un modèle multizone a été retenu. Le bâtiment a été décomposé en deux zones : le rez de chaussée et l’étage. Au total, ce modèle comporte 14 paramètres :

- les capacités thermiques globales des zones associées à l’étage C_{Z1} et au rez de chaussée C_{Z2} ;
- l’échange de chaleur via la ventilation mécanique C_aR ;
- les capacités thermiques globales des murs c_m , de la dalle du rez de chaussée c_{Pb} , de la dalle de l’étage c_{Pi} et de la dalle du toit c_{Ph} ;
- les conductivités thermiques globales des murs k_m , de la dalle du rez de chaussée k_{Pb} , de la dalle de l’étage k_{Pi} et de la dalle du toit k_{Ph} ;
- les coefficients d’échange global intérieur h_i et extérieur h_e et le coefficient d’échange surfacique entre la dalle du rez de chaussée et le sol h_s .

Le jeu de valeurs initiales des paramètres est donné dans le tab.1 et la solution numérique associée est partiellement représentée sur la fig.2. Cette figure montre que la température moyenne simulée à l’étage présente des écarts importants avec la température mesurée notamment pendant les périodes de chauffe. Ceci justifie la nécessité du recalage de modèle.

Paramètre (unité)	Valeur initiale	Valeur recalée avec 8 capteurs	Valeur recalée avec 1 seul capteur
C_{Z1} (J/K)	1.4×10^5	1.4×10^5	1.4×10^5
C_{Z2} (J/K)	1.4×10^5	1.4×10^5	1.4×10^5
k_m (W/(m.K))	1.4	1.4	1.4
c_m (J/K)	18×10^5	20×10^5 (↑ 10%)	18×10^5
k_{Pb} (W/(m.K))	2	2	2
c_{Pb} (J/K)	25×10^5	25×10^5	25×10^5
k_{Pi} (W/(m.K))	2	2	2
c_{Pi} (J/K)	25×10^5	25×10^5	25×10^5
k_{Ph} (W/(m.K))	2	2	2
c_{Ph} (J/K)	25×10^5	25×10^5	25×10^5
h_i (W/(m ² .K))	7.7	1.54 (↓ 80%)	1.46 (↓ 81%)
h_e (W/(m ² .K))	24	24	24
h_s (W/(m ² .K))	5	5	5
C_aR (W/K)	39	39	39

TABLE 1: Paramètres du modèle thermique avant recalage et après recalage vis-à-vis de la quantité d’intérêt définie dans l’équation (8) en considérant 8 capteurs ou 1 unique capteur de température positionné à l’étage

Dans cet article, nous considérons comme quantité d’intérêt Q la température moyenne à l’étage à la fin d’une période de chauffe :

$$Q = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1=125h}^{t_2=128h} T_{ff} dt \quad (8)$$

où T_{ff} représente la température moyenne de l’open-space à l’étage. D’autres quantités d’intérêt ont été étudiées dans (Djatouti et al., 2020b).

Dans le processus de recalage de paramètres du modèle à deux zones, 8 capteurs ont été considérés pour le bâtiment : température moyenne à l'étage T_{ff}^{mes} (resp. au rez de chaussée T_{gf}^{mes}), la température de surface intérieure et extérieure de la paroi Sud à l'étage $T_{ffInt-Sud}^{mes}$ et $T_{ffExt-Sud}^{mes}$ (resp. la paroi Est à l'étage $T_{ffInt-Est}^{mes}$ et $T_{ffExt-Est}^{mes}$), la température de dalle à l'étage T_{if}^{mes} et la température de la dalle au rez de chaussée T_{lf}^{mes} . Le paramètre de régularisation α intervenant dans la méthode inverse a été choisi à 300 afin de satisfaire un principe de discrèpance étendu. Ce principe consiste à vérifier que l'écart entre températures simulées et mesurées est proche mais strictement supérieur à la somme des erreurs de mesure et de modèle. Dans notre application, l'erreur de mesure a été évaluée à $0,5^{\circ}C$ par notre département de Métrologie. Quant à l'erreur de modèle, celle-ci a été estimée empiriquement à $0,5^{\circ}C$. Comme le montre le tab. 1, seuls 2 paramètres sont recalés par la méthode inverse proposée. La capacité thermique des murs est augmentée de 10% alors que le coefficient d'échange intérieur h_i est fortement diminué de 80%. La valeur recalée de h_i à $1,54W/(m^2.K)$ semble cohérente au regard du coefficient d'échange surfacique intérieur déterminé expérimentalement à $2,1W/(m^2.K)$ par un essai de thermique stationnaire dans Sense-City. Du fait des écarts importants de températures entre la pièce et les surfaces avoisinantes des murs et des dalles (cf fig.2) et de la faible résistance thermique des parois, le coefficient d'échange h_i est le paramètre "clé" pour une bonne prédiction de la quantité d'intérêt considérée. La quantité d'intérêt est estimée à $6,8^{\circ}C$ sans recalage et à $13,9^{\circ}C$ après recalage. La quantité d'intérêt ayant été mesurée à $14,7^{\circ}C$ dans cette application, l'erreur sur la quantité d'intérêt passe donc de $8^{\circ}C$ (sans recalage) à $0,8^{\circ}C$ (après recalage). L'amélioration de la prédiction de la température moyenne à l'étage durant les périodes de chauffe est également mise en exergue sur la fig.2.

3.3 RÉDUCTION DE L'INSTRUMENTATION PAR L'APPROCHE ORIENTÉE QUANTITÉ D'INTÉRÊT

Dans cette dernière partie, on propose d'utiliser l'outil d'analyse de sensibilité présenté dans la section 2 dans le but de réduire l'instrumentation nécessaire pour la prédiction de la quantité d'intérêt (8). Après la résolution numérique du problème couplé (5), on évalue la sensibilité de la quantité d'intérêt à chacun des 8 capteurs considérés dans la partie précédente à l'aide de la formule (7). Les résultats sont synthétisés sur la fig. 3. On constate sans surprise que le capteur de température dans la pièce à l'étage est crucial dans la prédiction de la quantité d'intérêt. Par contre, les capteurs mesurant la température sur les surfaces intérieures de l'étage (dalle de l'étage et parois intérieures Est et Sud) ont une faible contribution. En effet, la somme de ces trois sensibilités représente moins d'un quart du diagramme de la fig.3. Ainsi, pour la prédiction de la quantité d'intérêt, seul le capteur de température à l'étage serait essentiel. Afin de le vérifier, le recalage de la quantité d'intérêt a été réalisé avec cet unique capteur et les résultats sont donnés dans le tab. 1. On observe que seul le paramètre d'échange surfacique intérieur h_i est ajusté à une valeur peu différente de celle obtenue avec 8 capteurs. La quantité d'intérêt obtenue après recalage avec un seul capteur est de $14,4^{\circ}C$, ce qui est en accord avec la valeur mesurée expérimentalement de $14,7^{\circ}C$.

Pour conclure, nous avons présenté dans cet article une première validation expérimentale de la méthode inverse avec un jeu de données obtenu dans une chambre climatique sous conditions contrôlées. Des études complémentaires devront être réalisées sur des bâtiments réels.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR pour son soutien au travers de l'équipement d'excellence Sense-City (ANR-10-EQPX-48). Un grand merci également à l'équipe Sense-City et tout particulièrement à Erick Merliot et Philippe Bruley.

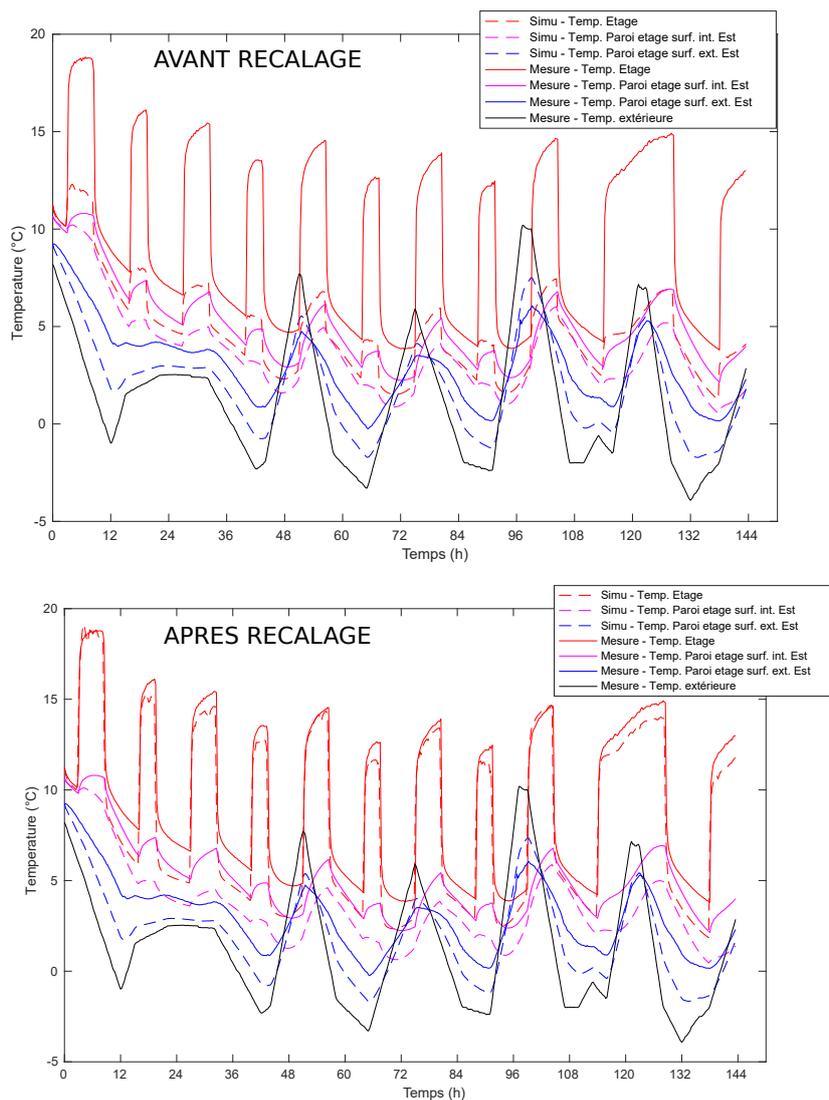


FIGURE 2. Températures mesurées dans le bâtiment R+1 de Sense-City et températures simulées sans recalage (en haut) et après recalage par la méthode inverse orientée “quantité d’intérêt” (en bas) avec les 8 capteurs

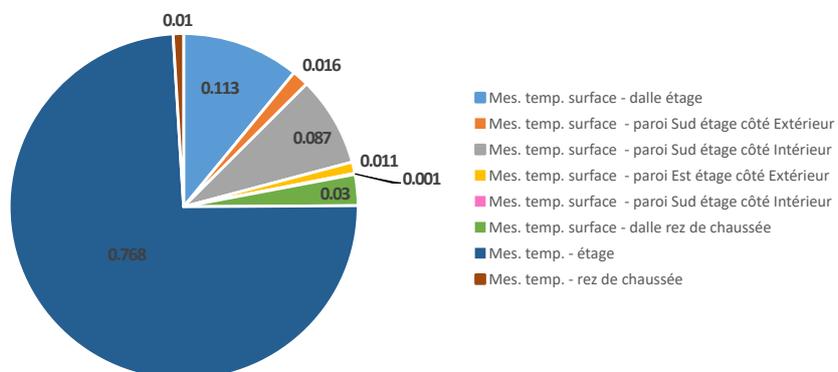


FIGURE 3. Sensibilité de la quantité d’intérêt (8), obtenue par couplage mesure/modèle, à chacune des 8 mesures considérées dans la Section 3

RÉFÉRENCES

- AFNOR (2014). Norm ISO 9869-1 :2014 Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1 : heat flow meter method.
- Alzetto, F., Pandraud, G., Fitton, R., et Heusler, I. (2018). QUB : A fast dynamic method for in-situ measurement of the whole building heat loss. *Energy and Buildings*, 174 :124–133.
- Beck, J., Blackwell, B., et St. Clair, C. (1985). Inverse heat conduction. ill-posed problems. New York etc., J. Wiley & Sons.
- Becker, R. et Rannacher, R. (2001). An optimal control approach to a posteriori error estimation in finite element methods. *Acta Numerica*, 10.
- Berger, J., Orlande, H., Mendes, N., et Guernouti, S. (2016). Bayesian inference for estimating thermal properties of a historic building wall. *Building and Environment*, 106 :327–339.
- Chouaki, A., Ladevèze, P., et Proslie, L. (1996). An updating of structural dynamic model with damping. *Inverse Problems in Engineering : Theory and Practice*, pages 335–342.
- Derx, F., Lebental, B., Bourouina, T., Bourquin, F., Cojocar, C.-S., Robine, E., et Van Damme, H. (2012). The Sense-City project. In *XVIIIth Symposium on Vibrations, Shocks and Noise*.
- Djatouti, Z., Waeytens, J., Chamoin, L., et Chatellier, P. (2020a). Coupling a goal-oriented inverse method and proper generalized decomposition for fast and robust prediction of quantities of interest in building thermal problems. *Building Simulation*, 13 :709–727.
- Djatouti, Z., Waeytens, J., Chamoin, L., et Chatellier, P. (2020b). Goal-oriented sensor placement and model updating strategies applied to a real building in the sense-city equipment under controlled winter and heat wave scenarios. *Energy and Buildings*, page 110486.
- Djatouti, Z., Waeytens, J., Chamoin, L., et Chatellier, P. (2020c). Thermal behavior of a two-story concrete building under controlled winter and heat wave scenarios in the sense-city equipment through temperature, flux and energy consumption dataset. *Data in Brief*, 33 :106458.
- Ha, T.-T., Feuillet, V., Waeytens, J., Zibouche, K., Thebault, S., Bouchie, R., Le Sant, V., et Ibos, L. (2020). Benchmark of identification methods for the estimation of building wall thermal resistance using active method : Numerical study for iwi and single-wall structures. *Energy and Buildings*, 224 :110–130.
- Nassiopoulos, A., Kuate, R., et Bourquin, F. (2014). Calibration of building thermal models using an optimal control approach. *Energy and Buildings*, 76 :81–91.
- Rouchier, S. (2018). Solving inverse problems in building physics : An overview of guidelines for a careful and optimal use of data. *Energy and Buildings*, 166 :178–195.
- Thebault, S. et Bouchié, R. (2018). Refinement of the ISABELE method regarding uncertainty quantification and thermal dynamics modelling. *Energy and Buildings*.