

Campagnes de mesures rapides pour l'identification de modèles légers de bâtiments en vue du contrôle.

Hugo VIOT^{1*}, Alain SEMPEY¹, Laurent MORA¹, Jean-Christophe BATSALE¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

CNRS, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

* (auteur correspondant : hugo.viot@u-bordeaux.fr)

Résumé - La consommation énergétique d'un bâtiment dépend de l'utilisation qui en est faite, il est donc primordial de s'intéresser à la gestion énergétique du couple bâtiment/systèmes en phase d'exploitation. Nombre d'études montrent qu'un pilotage optimum des équipements de chauffage représente un gisement important d'économies d'énergie qui sont désormais rendues possibles avec le développement de solutions domotiques. Pour une gestion efficace du chauffage, l'utilisation d'un contrôleur intégrant un modèle mathématique du comportement thermique d'un bâtiment passe par le choix et la validation d'un modèle respectant le principe de parcimonie, c'est à dire léger mais suffisamment fiable pour être compatible avec du contrôle temps réel et prédictif. Ce papier propose d'utiliser une approche modèle hybride c'est à dire construit "à priori" à partir de la connaissance physique du bâtiment mais aussi de mesures puisque les paramètres de ce modèle sont identifiés à l'aide de résultats de campagnes de mesures courtes en utilisant une caméra infrarouge. Dans un premier temps un essai est effectué sur une maquette en laboratoire qui a l'avantage d'être bien maîtrisée avec moins de biais qu'un bâtiment réel et un temps de réponse court. Dans un second temps une pièce expérimentale est utilisée et comprend un système de chauffage par plancher chauffant dont il faut saisir la dynamique. Trois modèles de type analogie électrique (RC) sont proposés. A chaque modèle correspond une façon de prendre en compte l'effet du plancher chauffant sur la température intérieure et donc une métrologie associée différente. A partir d'un jeu de paramètres initial, une procédure d'identification est menée pour chacun des modèles. Les résultats montrent que les paramètres initiaux estimés par le calcul ne permettent pas d'obtenir un modèle fidèle à la dynamique mesurée. Après comparaison des modèles identifiés, il apparait que la connaissance de la température de surface permet d'avoir la meilleure description, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la thermographie infrarouge dans le bâtiment.

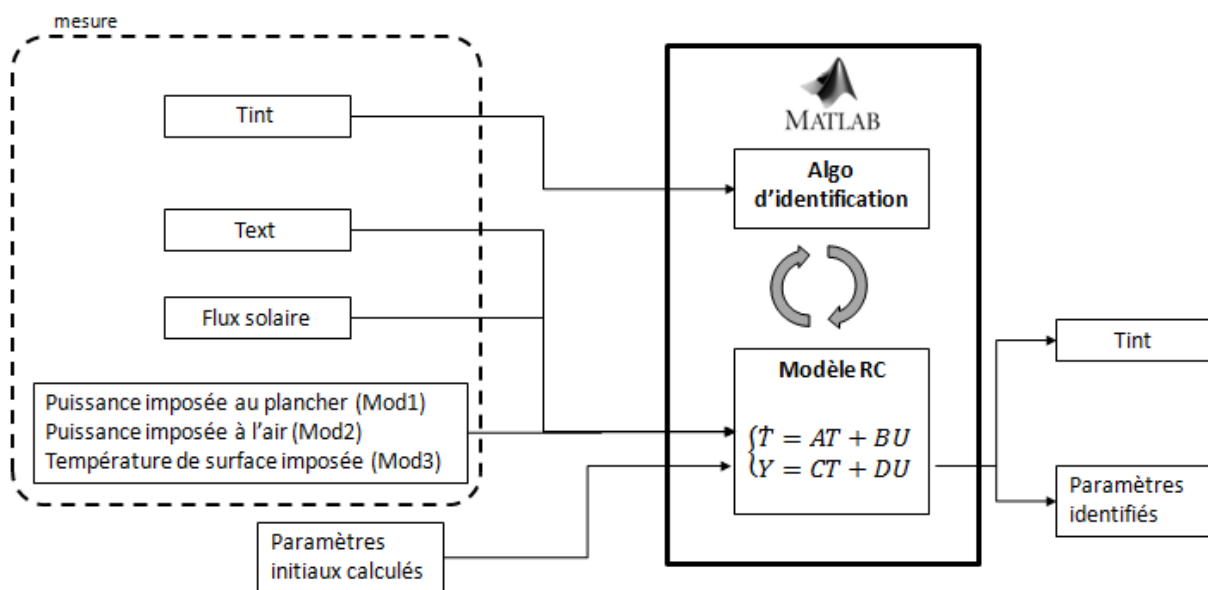


Figure 1 : Principe de la méthode d'identification.

Nomenclature

C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	dp	départ plancher
h	coeff d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	e/ext	extérieur
\dot{m}	débit massique, $kg.s^{-1}$	env	environnement thermique
P	puissance, W	g	gains internes
R	résistance thermique, $m^2.K.W^{-1}$	i/int	intérieur
S	surface, m^2	m	mur
T	température, °C	pl	plancher
U	coefficient de transmission, $W.m^{-2}.K^{-1}$	rp	retour plancher
<i>Symboles grecs</i>		S	gains solaires
ε	émissivité	s/surf	surface
σ	cste de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$	sd	surface de la dalle
<i>Indices et exposants</i>		app	apparente
cn	corps noir	v	infiltrations
CTA	centrale de traitement d'air	VCV	ventilo-convecteur
d	dalle		

1. Introduction

La recherche de performance énergétique dans le bâtiment se fait généralement en phase de conception et est encadrée en France par la réglementation thermique en vigueur. Bien que liées à la conception, les dépenses énergétiques dépendent de l'usage du bâtiment. Ainsi ces travaux s'intéressent au développement et à la validation de modèles légers pour le pilotage optimal des équipements de chauffage, dont de nombreux travaux ont montré l'intérêt [1-3].

Classiquement, le pilotage du chauffage se fait par un thermostat programmable associé à des systèmes ayant un temps de réponse court (convecteur, ventilo-convecteur, plinthe électrique). Pour les systèmes ayant un temps de réponse long comme les planchers chauffants, la régulation se fait sur la température de départ au travers d'une loi d'eau. Un système d'appoint est souvent nécessaire pour ajuster la température intérieure. Dans le cas de locaux à occupation intermittente (tertiaire, enseignement), le système à long temps de réponse est programmé pour se lancer en avance par rapport aux périodes d'occupation. Cette durée de relance est fixe et estimée par l'utilisateur pour que la consigne soit atteinte en début d'occupation. Or ce temps de relance varie car il est fonction des conditions extérieures et intérieures. Une relance trop rapide entraîne une surconsommation et une relance trop lente une surconsommation de l'appoint ainsi qu'une situation d'inconfort. L'utilisation d'un contrôleur prédictif permet de palier ces problèmes [4].

Un contrôleur prédictif à modèle interne (MPC) nécessite d'embarquer un modèle du système à contrôler qui doit respecter le principe de parcimonie [5] pour être éligible au contrôle. Le préalable à l'utilisation d'un tel contrôleur est donc la validation d'un modèle. Le choix est fait d'utiliser des modèles de type «boite grise» dont les paramètres sont identifiés à partir de données mesurées lors de campagnes de mesures courtes à l'échelle de temps d'un bâtiment (quelques jours). Ces campagnes font intervenir un dispositif de mesure infrarouge.

L'objectif final est de déterminer pour un bâtiment démonstrateur équipé d'un plancher chauffant, quel est le couple modèle/métriologie adapté pour un meilleur contrôle.

2. Démarche et méthode

Une campagne de mesure est menée en imposant des échelons de puissance sur le système de chauffage étudié. Un modèle de type analogie électrique est ensuite construit à partir de la connaissance des caractéristiques physiques du bâtiment. Après traitement des données

mesurées, une procédure d'identification permet de trouver le jeu de paramètres s'approchant le plus de la dynamique mesurée. Ces actions sont effectuées dans l'environnement MATLAB.

2.1. Campagne de mesure

2.1.1. Description du bâtiment démonstrateur

Le bâtiment étudié est une salle de conférence située au deuxième étage de l'IUT Génie Civil de Bordeaux, sa surface est d'environ 200m². Cette salle, orientée ouest, est conforme à la réglementation thermique 2005. Elle est en contact avec l'extérieur par une grande façade vitrée avec bardage métallique à l'ouest et par un mur pignon non vitré isolé par l'intérieur au sud. La paroi est est en contact avec un local non chauffé et la paroi nord avec un bureau adjacent chauffé (Fig.2). Le renouvellement d'air est assuré par une centrale de traitement d'air (CTA) double flux et le chauffage par un plancher chauffant et des ventilo-convecteurs. Le plancher chauffant est régulé en température par l'ouverture d'une vanne 3 voies. La dalle du plancher est constituée de 2cm de béton anhydre et isolé du bas par 2 cm de polystyrène.

2.1.2. Déroulement de la campagne

La campagne de mesure s'est déroulée du 22/02/2013 au 28/02/2013 (six jours). Seul le plancher chauffant est utilisé: les volets de la CTA sont fermés (débit nul) et les ventilo-convecteurs sont éteints. Les quatre premiers jours le bâtiment est en "évolution libre", c'est à dire soumis seulement aux variations de température extérieure et aux apports solaires. Puis il est soumis à deux échelons (26/02-11h et 27/02-9h30) sur la température d'entrée du plancher fixée à 35°C. Les échelons ont une durée respective de 4h et 8h et sont séparés d'une journée. Entre les deux échelons le bâtiment est en évolution libre et se décharge thermiquement (Fig.4).

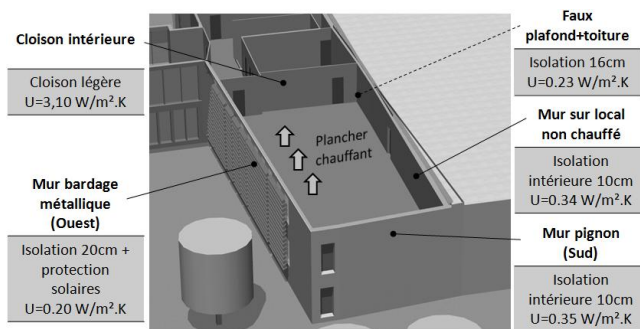


Figure 2 : Salle étudiée au deuxième étage du bâtiment démonstrateur

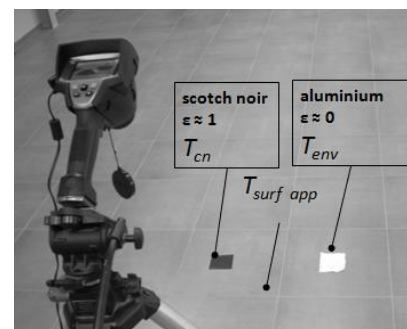


Figure 3 : Mesures IR à l'aide d'un scotch d'émissivité connue pour corriger la température apparente et d'un papier aluminium pour calculer les échanges radiatifs pièce-plancher

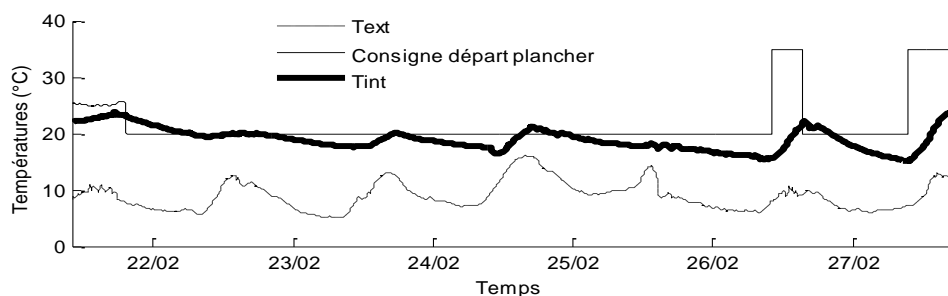


Figure 4 : Campagne de mesure

Des capteurs permettent de mesurer les grandeurs suivantes: température entrée/sortie du plancher chauffant, température d'air intérieur et extérieur. Les données de rayonnement sont récupérées auprès de Météo France et les apports solaires sont calculés avec un modèle du bâtiment dans l'environnement logiciel COMFIE +Pleiades. La mesure infrarouge utilise un protocole couramment utilisé [6,7] et permet de suivre l'évolution en température de la surface du plancher au cours du temps (Fig.3). La scène thermique ne couvre qu'une petite surface du plancher ($\approx 2\text{m}^2$), afin de vérifier que cette surface est représentative du reste du plancher, une cartographie infrarouge est réalisée à un instant t et en régime transitoire. Elle est comparée en terme de température moyenne à la scène thermique au même instant. La différence obtenue est de 0.1°C donc les observations sur la scène thermique peuvent être extrapolées au reste du plancher chauffant.

2.2. Choix et construction des modèles

2.2.1. Nature du modèle

Le choix du modèle se fait sur le critère de la parcimonie, il doit être simplifié pour être compatible avec du pilotage temps réel (pas de temps de quelques minutes), mais suffisamment fiable pour le contrôle. La littérature est riche et les modèles peuvent être distingués de la façon suivante comme proposé par Li et Wen [8]:

- modèles déterministes ou de connaissances dits « boîte blanche » construits à partir des lois physiques
- modèles empiriques dits « boîte noire » construits sur la base de mesures entrée/sortie
- modèles hybrides dits « boîte grise » correspondant à une modélisation semi-physique qui prend en considération à la fois les connaissances et les mesures comme c'est le cas pour ces travaux

On choisit d'utiliser un modèle de type analogie électrique (RC) pour son aspect intuitif et sa facilité de compréhension. De plus ce type de modèle est largement éprouvé dans le domaine de la recherche et de l'ingénierie sur le bâtiment puisque des outils de conception et des moteurs de calculs réglementaires sont basés là dessus.

2.2.2. Modèles RC du bâtiment démonstrateur

Trois modèles de type analogie électrique (RC) sont proposés. A chaque modèle correspond une façon de prendre en compte l'effet du plancher chauffant sur la température intérieure et utilise des mesures différentes:

- modèle 1: puissance imposée au niveau du plancher calculée avec les mesures de températures sur le tuyau aller et retour du plancher (Eq.1). Le débit fixe est connu: $\dot{m} = 0.25 \text{ kg/s}$

$$P_{pl} = \dot{m}C_p(T_{dp} - T_{rp}) \quad (1)$$

- modèle 2: puissance imposée à l'air calculée avec la mesure de température intérieure et les mesures infrarouge de surface (Eq.2)

$$P_{pl,i} = S\varepsilon\sigma(T_{surf}^4 - T_{env}^4) + hS(T_{surf} - T_i) \quad (2)$$

- modèle 3: température imposée à la surface de la dalle et mesurée avec la caméra infrarouge (Eq.3)

$$T_{sd} = T_{surf} \quad (3)$$

Les résistances thermiques de la dalle de plancher et des murs sont représentées par les résistances électriques R_d , R_{mi} et R_{me} . Le terme R_v correspond aux infiltrations. Les sources de courant P_s , P_g , P_{cta} et P_{vcv} représentent respectivement les apports solaires, les gains internes, le renouvellement d'air et les ventilo-convecteurs. La figure 5 montre les modèles associés aux mesures. Ils sont formulés sous forme d'équation d'état. Dans un premier temps les paramètres initiaux de ces modèles (résistances, capacités) sont déterminés à partir des caractéristiques physiques de l'enveloppe puis identifiés par la suite.

2.3. Procédure d'identification

L'algorithme d'identification fait appel à la fonction « fmincon » de la « optimization toolbox » de MATLAB qui permet de minimiser une fonction multivariable avec contraintes. Ce choix est motivé par la publication de travaux similaires faisant intervenir des modèle RC de même ordre [9,10]. L'algorithme « interior point » [11] appelé par la fonction « fmincon » permet de trouver de proche en proche et dans des intervalles de valeurs bornés par l'utilisateur, le jeu de paramètres qui permet de minimiser une fonction appelée « deviation ». Elle est définie comme la somme quadratique de l'écart entre la température intérieure mesurée et la température intérieure en sortie du modèle (Eq.4).

$$deviation = \sum_{i=0}^N (T_i - \hat{T}_i)^2 \quad (4)$$

Le programme prend en entrée les mesures des sollicitations extérieures et intérieures ainsi que le jeu de paramètres initial (Fig.1 page de résumé). La procédure est effectuée pour chacun des trois modèles.

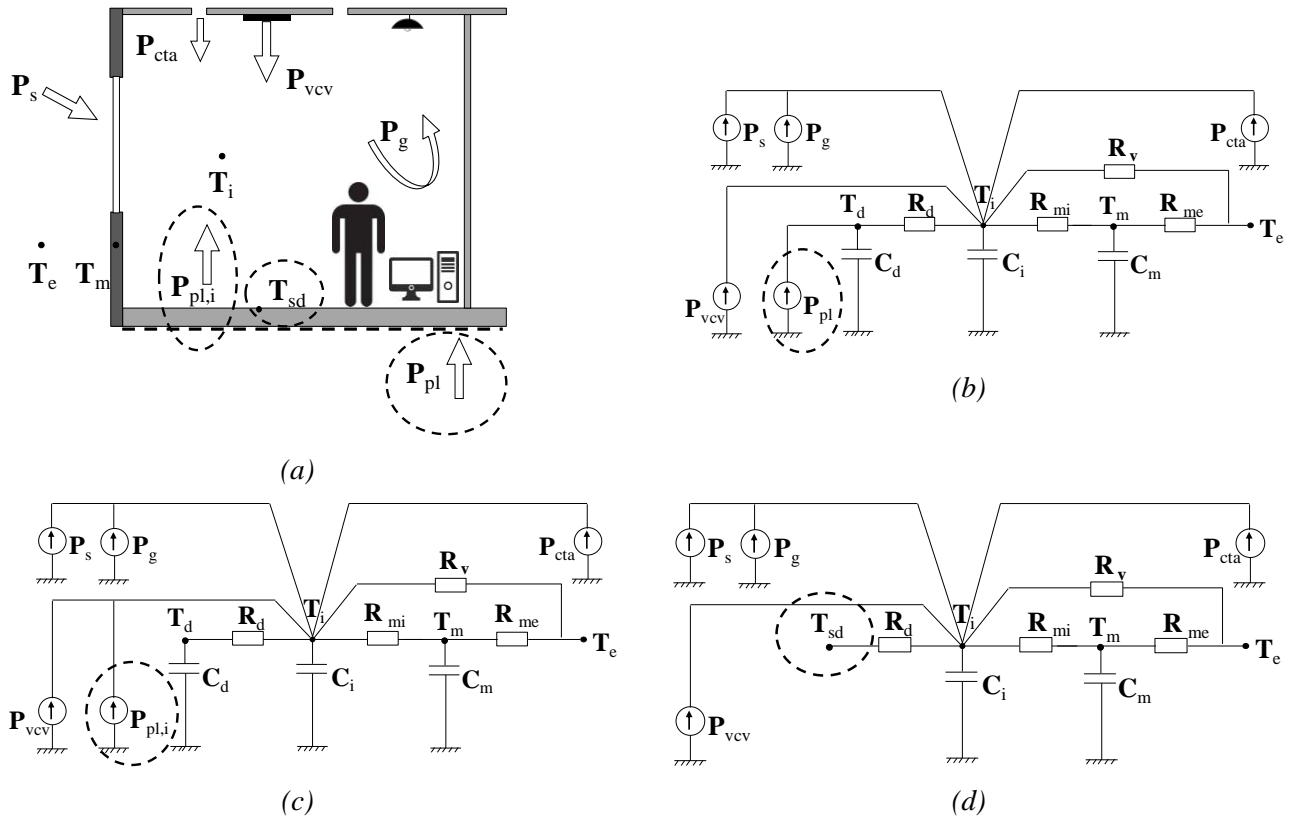


Figure 5 : (a) Représentation schématique des modèles 1 (b), modèle 2 (c) et modèle 3 (d)

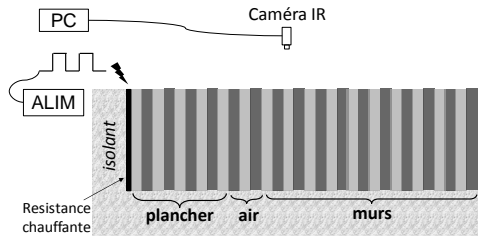


Figure 6 : Mesure sur la maquette

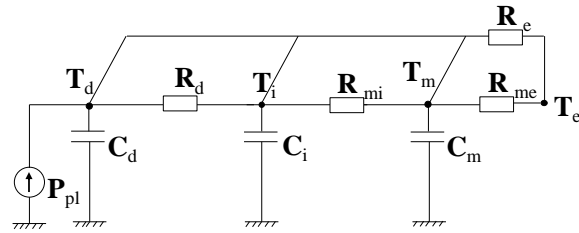


Figure 7 : Modèle RC associé

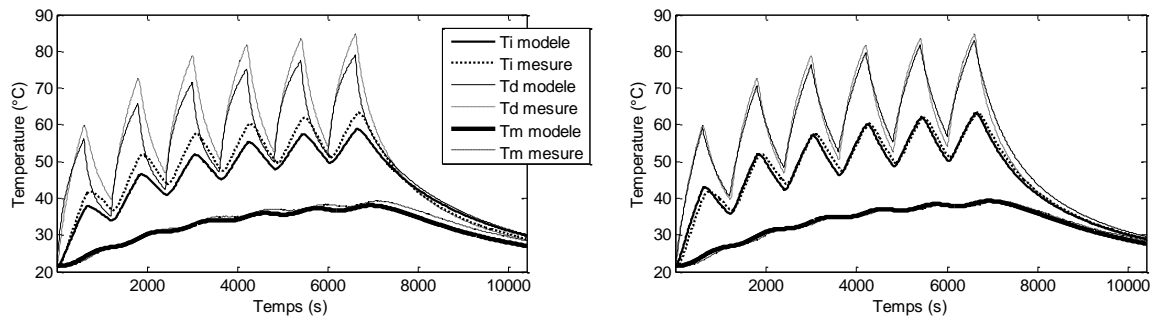


Figure 8 : Résultats pour le modèle non identifié (gauche) et identifié (droite)

3. Application à un cas simple

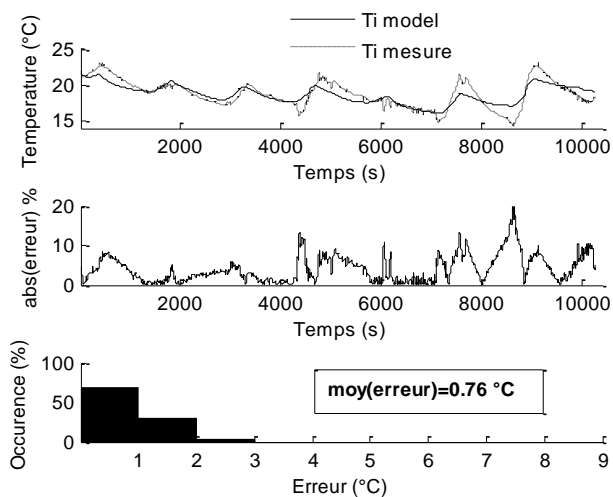
Pour un bâtiment réel les sources d'incertitudes sont nombreuses [12]. Dans un premier temps, pour valider la méthode, une maquette de laboratoire est utilisée. Elle a l'avantage d'être bien maîtrisée avec moins de biais. La maquette est un bloc multicouche de dimensions $5.3\text{cm} \times 6.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ constituée d'une alternance de 27 plaques d'aluminium et de polychlorure de vinyle (PVC). Pour faire l'analogie avec un bâtiment, le nœud d'air est représenté arbitrairement par un certain nombre de couches, le reste des couches se trouvant à gauche représentent le plancher sollicité par une résistance chauffante, les couches de droite représentent un mur extérieur. Une campagne de mesure est faite dans la configuration où la maquette est uniquement chauffée à gauche de manière périodique avec une puissance de 2W. La face du dessous est isolée. Celle de droite et du dessus sont en contact avec l'air de la pièce qui est à une température de 21°C (Fig.6). Le modèle RC associé est présenté (Fig.7) et comprend trois nœuds: température intérieure T_i , température de la dalle T_d et des murs T_m . La procédure d'identification est menée à partir de cette campagne de mesure comme décrite partie 2.3.

La figure 8 montre les évolutions en température des trois nœuds pour le modèle non identifié (jeu de paramètres initial calculé) et le modèle identifié (jeu de paramètres optimal). Les résultats confortent la méthode puisque l'erreur moyenne entre le modèle et la mesure est de 1.1°C contre 2.5°C avant identification. De plus la dynamique de montée et descente en température est mieux représentée par le modèle.

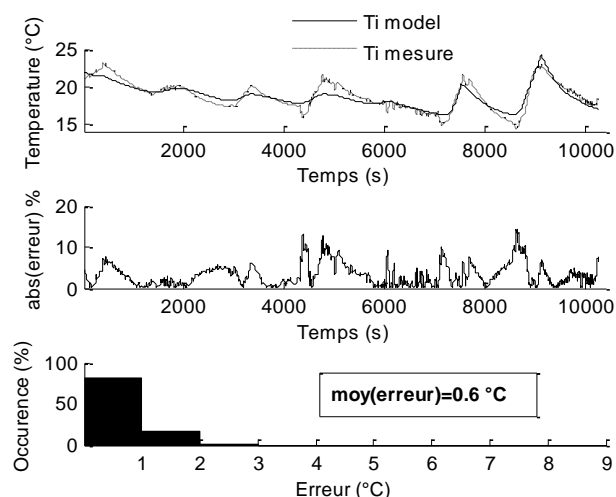
La comparaison entre les valeurs initiales et les valeurs identifiées montrent que même pour un cas très simple constitué de matériaux bien connus, il est difficile d'estimer les paramètres.

4. Résultats sur le bâtiment démonstrateur

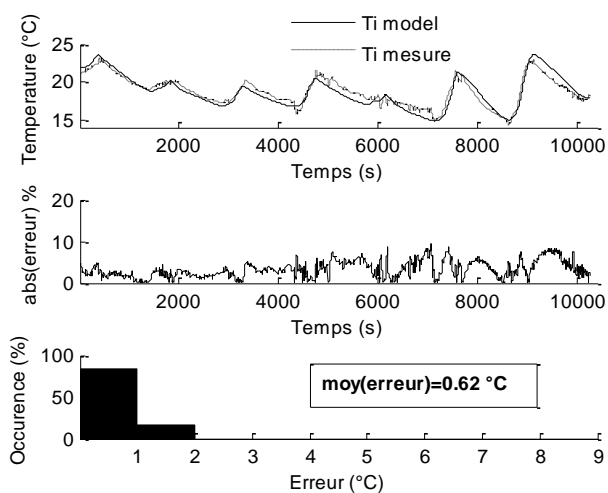
La méthode est appliquée aux trois modèles RC du bâtiment démonstrateur à partir de la campagne de mesure décrite partie 2.1.2. Pour le modèle 1 (Fig. 9a), modèle 2 (Fig. 9b) et modèle 3 (Fig. 9c), on trace la température intérieure du modèle avec la température intérieure



(a)



(b)



(c)

	init	mod1	mod2	mod3
Ci	7.10^5	7.10^6	2.10^7	6.10^6
Cd	7.10^6	2.10^8	7.10^7	-
Cm	1.10^8	1.10^8	1.10^8	1.10^8
Rmi	2	7	4,1	6
Rme	0,01	0,001	0,001	0,1
Rv	1	1,1	1	1
Rd	0,14	1,4	0,27	0,58

Tableau 1 : Jeu de paramètres optimal pour chacun des modèles

Figure 9 : Résultats de l'identification : (a) modèle 1; (b) modèle 2; (c) modèle 3

mesurée, l'erreur relative et la distribution de celle-ci. Les valeurs de paramètres identifiés sont relevées et comparées aux valeurs de paramètres initiaux (Tab.1).

Le modèle 1 est fiable pour la période d'évolution libre mais ne suit pas la dynamique mesurée lors des deux échelons. Le modèle 2 présente le comportement inverse, il suit très bien la dynamique des deux derniers jours mais moins en période d'évolution libre. Le modèle 3 est le plus représentatif; que le bâtiment soit en évolution libre ou sollicité par le plancher chauffant. Dans les trois cas l'erreur moyenne est inférieure à 1°C.

La comparaison entre les valeurs initiales et identifiées montre d'une part que les paramètres sont difficiles à estimer à partir de la connaissance physique du bâtiment. En effet comme cela a déjà été souligné par Mangematin et al. [13]; les capacités en jeu correspondent à une inertie apparentes. D'autre part les valeurs identifiées diffèrent également entre les modèles et ne correspondent pas forcément à une réalité physique.

Ces modèles devant servir au contrôle, ce sont les écarts au moment des sollicitations à contrôler qui sont déterminants. En conséquence le modèle 1 ne peut pas être éligible au contrôle en l'état. La représentation du plancher chauffant par une seule résistance et une seule capacité ne permet pas de modéliser toute la dynamique du plancher chauffant. Si l'on choisit

de contrôler le plancher chauffant par la mesure des températures entrée/sortie, une description plus fine du plancher est nécessaire (résistances-capacités supplémentaires). Le modèle 2 semble satisfaisant pour le contrôle tout comme le modèle 3 qui présente les meilleurs résultats car la dynamique du plancher est contenue dans la mesure de température de surface. En conclusion de cette première approche: la connaissance de la température de surface du plancher chauffant permet d'avoir un modèle plus fiable pour le contrôle.

5. Conclusion et perspectives

Les travaux présentés sont un préliminaire au déploiement d'un contrôleur prédictif sur le bâtiment démonstrateur. Il est admis que la qualité de l'identification dépend aussi de la richesse des mesures, or dans ces travaux seul la réponse du plancher chauffant à un échelon est présenté. Afin d'étudier l'impact sur l'identification des modèles proposés, d'autres campagnes de mesures du même type vont être faites dans d'autres conditions (été, mi-saison) et avec des sollicitations plus riches (plusieurs échelons). Une étude de sensibilité aux paramètres permettra de classer les paramètres à identifier en priorité. Enfin, il est prévu de solliciter le plancher par une séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA) et d'utiliser la mesure infrarouge comme outil de caractérisation et d'estimation des fonctions de transfert de modèle.

Références

- [1] R. Freire, G. Oliveira, N. Mendes, Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, *Energy Build.* 40 (2008) 1353–1365.
- [2] M. Le, S. Ploix, F. Wurtz, Application of an anticipative energy management system to an office platform, *Proceedings of BS2013* (2013).
- [3] R. Lepore, C. Renotte, M. Fr, E. Dumont, Energy consumption reduction in office buildings using model-based predictive control, *Proceedings of BS2013* (2013).
- [4] P.M. Morosan, Commande prédictive distribuée. Approches appliquées à la régulation thermique des bâtiments, Supélec, Thèse (2011).
- [5] O. Mejri, Développement de méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments, Université de Bordeaux, Thèse (2011).
- [6] P. Fokaidés, S. Kalogirou, Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Appl. Energy.* 88 (2011) 4358–4365.
- [7] D. Pajani, Thermographie - Principes et mesure, *Techniques de l'Ingénieur* (2013).
- [8] X. Li, J. Wen, Review of building energy modeling for control and operation, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 517–537.
- [9] J. Leclere, F. Wurtz, E. Wurtz, A low order envelope model for optimised predictive control of indoor temperature : development methodology and calibration with a numerical model, *Proceedings of BS2013* (2013).
- [10] A. Le Mounier, B. Delinchant, S. Ploix, Choix de structures de modèles pertinentes pour l'identification des systèmes de gestion d'énergie, *Conférence IBPSA* (2014).
- [11] P. Segalat, Méthodes de points intérieurs et de quasi-Newton, Université de Limoges, Thèse (2002).
- [12] C. Spitz, Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments, Université de Grenoble, Thèse (2012).
- [13] E. Mangematin, G. Pandraud, D. Roux, Quick measurements of energy efficiency of buildings, *C. R. Physique* 13 (2012) 383–390.