

# Identifiabilité des performances thermiques d'une façade-test soumise à des conditions climatiques réelles

## Identifiability of the thermal performance of a façade under real weather conditions

Manon RENDU<sup>1,2\*</sup>, Jérôme LE DRÉAU<sup>1,2</sup>, Dylan LESUEUR<sup>1</sup>, Maxime DOYA<sup>3</sup>, Patrick SALAGNAC<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LaSIE, La Rochelle Université, CNRS, UMR 7356  
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1

<sup>2</sup> 4evLab, La Rochelle Université, CNRS, Electricité de France EDF  
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1

<sup>3</sup> SAS TIPEE

8 rue Isabelle Autissier, 17140 Lagord

\* (auteur correspondant : [manon.rendu@univ-lr.fr](mailto:manon.rendu@univ-lr.fr))

**Résumé** – Un modèle thermo-aéraulique est utilisé pour simuler le comportement thermique d'une cellule-test et tester une méthode d'identification des paramètres d'un modèle simplifié associé. Ces paramètres sont les propriétés thermiques d'isolation (R) et de stockage (C) de la façade testée. Après la phase de calibration du modèle thermo-aéraulique, l'influence des conditions expérimentales sur l'identification des performances thermiques de la façade est évaluée (puissance de chauffage, dynamique du scénario, ...). Cette étude est appliquée à un cas simple de façade fortement isolée.

**Mots-clés** : Performance thermique, Bâtiment, Paroi, Identification, Expérimentation.

**Abstract** – A model coupling heat transfer and airflow is used to simulate the thermal behaviour of a test-cell and evaluate a methodology for identifying the parameters of a reduced model. These parameters are related to the thermal performances of the test-cell (thermal resistance and capacity). Once the main model calibrated, the impact of the experimental conditions on identification of the façade's thermal performance is assessed (heating power, dynamics of the heating scenario, etc.). This study is applied to a highly insulated wall.

**Keywords**: Thermal performance, Building, Wall, Identification, Experiment.

### Nomenclature

$C$	Capacité thermique, $J.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$HLC$	Coefficient de transfert thermique, $W.K^{-1}$	$c$	cellule-test
$P$	Puissance de chauffage, $W$	$e$	extérieur
$R$	Résistance thermique, $K.W^{-1}$	$f$	façade-test
$T$	Température, $^{\circ}C$	$i$	intérieur
		$TG$	garde thermique

## 1. Introduction

Premier secteur consommateur d'énergie en Europe [1], le bâtiment connaît de nombreuses innovations pour réduire ses besoins d'énergie. Parmi celles-ci, on retrouve le développement de nouvelles façades afin de réduire les déperditions thermiques des bâtiments et mieux maîtriser les apports de chaleur en exploitant la capacité des ressources naturelles (nouveaux matériaux, vitrages innovants, ...). Ces façades sont appelées « façades adaptatives ». La définition de leurs performances thermiques est nécessaire pour exploiter au mieux leur

potentiel. Or, « la complexité intrinsèque du comportement dynamique de ces systèmes, comparé à celui des composants d'enveloppe traditionnels, fait que les outils de simulation classiques et les méthodes d'évaluation expérimentales [...] ne peuvent pas être transposés intégralement dans le cas des façades adaptatives » [2]. De nouvelles méthodes sont requises.

Une nouvelle méthodologie est proposée dans cet article. Elle se base sur des mesures réalisées sur une installation expérimentale à échelle réelle, appelée cellule-test. Ses performances thermiques sont estimées par identification d'un modèle simplifié de la cellule-test. Mais avant de traiter des cas de façades adaptatives au comportement complexe, il est nécessaire de valider la méthode sur un cas de paroi simple, ici, une paroi opaque fortement isolée. Le résultat de l'identification dépend fortement des conditions d'essai [3] : les conditions aux limites imposées (extérieures) et celles choisies par l'expérimentateur (scénario de l'essai). Il est donc proposé d'analyser l'impact des conditions d'essai sur l'estimation des paramètres. Pour cela, un modèle thermo-aéraulique préalablement calibré, appelé modèle détaillé, a permis de générer des jeux de données simulées. A l'aide de ces éléments, nous proposons une méthode permettant de spécifier les conditions d'essais nécessaires à la juste estimation des performances thermiques préalablement à la réalisation d'essais expérimentaux.

Dans cet article, l'installation expérimentale est décrite. Ensuite, le modèle détaillé, le modèle simplifié et la méthode d'identification utilisés pour estimer les paramètres sont présentés. Enfin, une analyse numérique de l'impact des conditions expérimentales sur l'identification des paramètres est étudiée.

## 2. L'installation expérimentale

### 2.1. Description générale

L'installation expérimentale présentée en Figure 1 est un bâtiment laboratoire, avec des surfaces d'enveloppe tests à échelle réelle exposée au climat extérieur, situé au sein de la plateforme Tipee à La Rochelle.



Figure 1 : Photos de l'extérieur et de l'intérieur de l'installation expérimentale

Le bâtiment laboratoire fait office de garde thermique pour cinq cellules-test indépendantes. Les cellules-test sont des pièces fortement isolées sur cinq de leurs faces donnant sur un grand volume d'air régulé en température, appelé « garde thermique », afin de maximiser le flux de chaleur allant vers l'extérieur à travers la sixième face, appelée « façade-test ». La façade-test, visible sur la Figure 1, est composée d'une structure bois complétée par du polyuréthane de 120 mm d'épaisseur. Le tout est fermé par deux panneaux de contreplaqué bakérisé de 21 mm d'épaisseur chacun et recouvert d'une membrane étanche blanche côté extérieur.

La cellule-test étudiée mesure 5,64 mètres de long, 3 mètres de large et 3 mètres de haut. Un convecteur électrique d'une puissance maximale de 1500 W, placé au centre de la pièce, assure le chauffage de la cellule-test. Un ventilateur homogénéise la température de l'air dans la pièce.

## 2.2. Les ponts thermiques

Les ponts thermiques de cette installation, représentés sur la Figure 2, peuvent être classés en trois catégories :

- Les ponts thermiques liés à la structure de reprise des efforts mécaniques de la façade-test (des poutres en matériaux composites (visibles sur la Figure 1), de faible conductivité thermique, traversent les parois donnant sur la garde thermique à huit reprises),
- Les ponts thermiques dus à la fixation de la façade-test sur la cellule-test (visible dans le rectangle rouge sur la Figure 1),
- Les ponts thermiques dus aux autres causes (la traversée des parois donnant sur la garde thermique par les réseaux de ventilation et de climatisation ou les câbles, la porte de la cellule-test...).

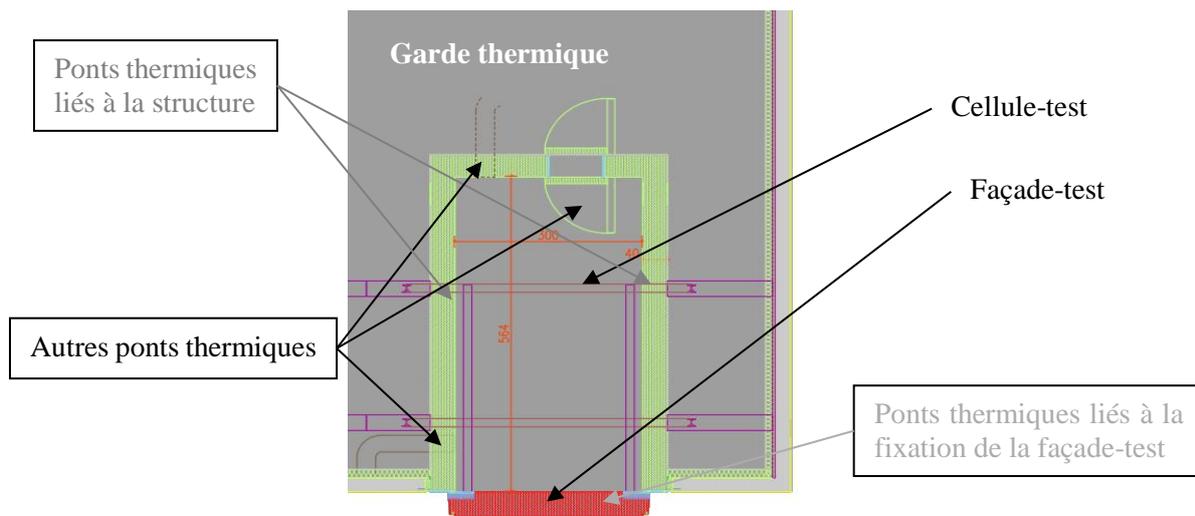


Figure 2 : Schéma de l'installation expérimentale – vue de dessus

## 2.3. Les données mesurées

Les températures d'air dans la cellule et dans la garde thermique sont mesurées par des capteurs de type Pt100. Une station météorologique complète permet de mesurer les conditions météorologiques extérieures : la température d'air et l'humidité relative (capteur VAISALA HMP1550), la pression atmosphérique (baromètre ADOLF THIES), la direction et la vitesse du vent (anémomètre sonique VAISALA WMT700), le rayonnement solaire direct et diffus et le rayonnement de grandes longueurs d'onde (pyranomètre et pyrgéomètre KIPP AND ZONEN SMP21-A et SGR4-A). L'incertitude des mesures de température est estimée à  $\pm 0,15$  °C. Le pas de temps d'acquisition est d'une minute.

Ces données sont mesurées lors de deux essais expérimentaux utilisant deux scénarii de chauffage différents. Le premier est un essai à partir d'un scénario de type *ROLBS* (Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence), fréquemment utilisé dans la littérature ([4]), générant des phases de chauffage de durées aléatoires et décorréliées des variations climatiques. Le second essai est réalisé à partir d'un scénario comportant un unique créneau de chauffage. Ce scénario est appelé *essai Créneau* dans la suite de l'article.

## 3. Les modèles détaillé et simplifié

L'objectif des modèles (détaillé ou simplifié) est de reproduire le comportement thermique de la cellule-test. On s'intéresse à l'ensemble de la cellule-test, et non pas seulement à la façade-test, notamment car cela simplifie les besoins en métrologie (limitation du nombre de

capteurs...) et permet une méthodologie commune quelle que soit la technologie de façade testée. Le comportement thermo-aéraulique de la cellule est influencé par la garde thermique et par l'extérieur donc les modèles prennent en compte ces deux conditions aux limites. Les paramètres à identifier sont la résistance thermique et la capacité de la façade-test et de la cellule-test, y compris les ponts thermiques.

### 3.1. Le modèle détaillé : le modèle thermo-aéraulique

Un modèle thermique dynamique multizone de l'installation expérimentale sous TRNSys 17© a été couplé à un modèle aéraulique sous Contam 3.2©. Le modèle thermique est composé de deux zones thermiques de température homogène : la cellule-test (dont la puissance de chauffage est contrôlée) et la garde thermique (contrôlée en température). La cellule-test est modélisée par six parois distinctes dont une est orientée à l'extérieur. Le modèle aéraulique calcule les débits d'infiltrations dans le bâtiment selon les conditions extérieures et intérieures (température et pression). Les deux modèles communiquent grâce à la méthode « Ping-Pong » [5], c'est-à-dire que les températures et les débits à l'instant  $t$  sont calculés à partir des températures et débits à l'instant  $t-1$ . Le pas de temps de simulation est de 15 minutes. Le fichier météorologique utilisé est constitué de données mesurées par la station météorologique située sur le site expérimental.

#### 3.1.1. Calibration du modèle détaillé

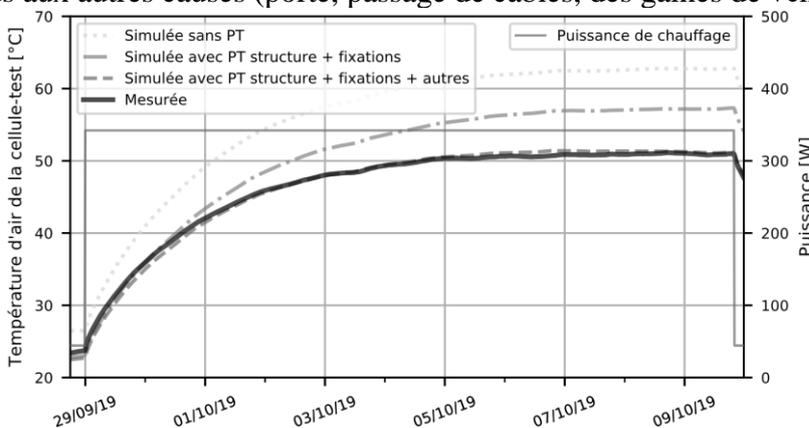
La calibration du modèle détaillé a été réalisée en plusieurs étapes grâce aux deux essais présentés en partie 2.3 : l'*essai ROLBS* et l'*essai Créneau*. Tout d'abord, les ponts thermiques liés à la structure et à la fixation de la façade-test ont été assimilés à des murs multicouches. Leurs propriétés ont été estimées par identification à partir des données mesurées lors de l'*essai ROLBS*. Puis, le modèle a été calibré grâce à l'*essai Créneau* en ajoutant un pont thermique correspondant aux autres causes de déperditions (réseaux de ventilation et climatisation, câbles traversants la paroi donnant sur la garde thermique, la porte...). Enfin, le modèle a été validé par la confrontation des résultats obtenus par simulation et ceux mesurés lors de l'*essai ROLBS*.

##### *Prise en compte des ponts thermiques liés à la structure et à la fixation de la façade-test*

La méthodologie pour modéliser les ponts thermiques dynamiques liés à la structure et à la fixation de la façade-test est proposée dans [6]. Ici, les ponts thermiques sont modélisés comme des murs équivalents, composés d'une ou plusieurs couches, ayant des propriétés thermiques équivalentes à une paroi de même dimension.

##### *Prise en compte des autres ponts thermiques*

La Figure 3 montre l'impact de l'ajout d'un pont thermique représentant les ponts thermiques dus aux autres causes (porte, passage de câbles, des gaines de ventilation...).



Ecarts absolus :

-sans PT

$$|\Delta T| = 9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

-avec PT structure

$$|\Delta T| = 4,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- avec PT structure + autres

$$|\Delta T| = 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

PT = « ponts thermiques »

Figure 3 : Evolution de la température d'air de la cellule-test pour l'essai Créneau

A droite de la figure sont indiqués les écarts absolus entre les températures mesurées et les températures simulées. L'ajout du pont thermique divise l'écart absolu moyen par 10. Ce pont thermique est assimilé à une paroi faiblement isolée de  $0,45 \text{ m}^2$  entre la cellule et la garde thermique constituée d'une couche unique de  $10 \text{ cm}$  d'épaisseur.

### 3.1.2. Validation du modèle détaillé

Le modèle thermo-aéraulique (modèle détaillé) est validé en comparant la température d'air mesurée dans la cellule-test lors de l'essai *ROLBS* et la simulation de cette température avec le modèle thermo-aéraulique. La Figure 4 montre l'évolution de ces deux variables lors de l'essai *ROLBS*. L'écart moyen est inférieur à  $1^\circ\text{C}$ .

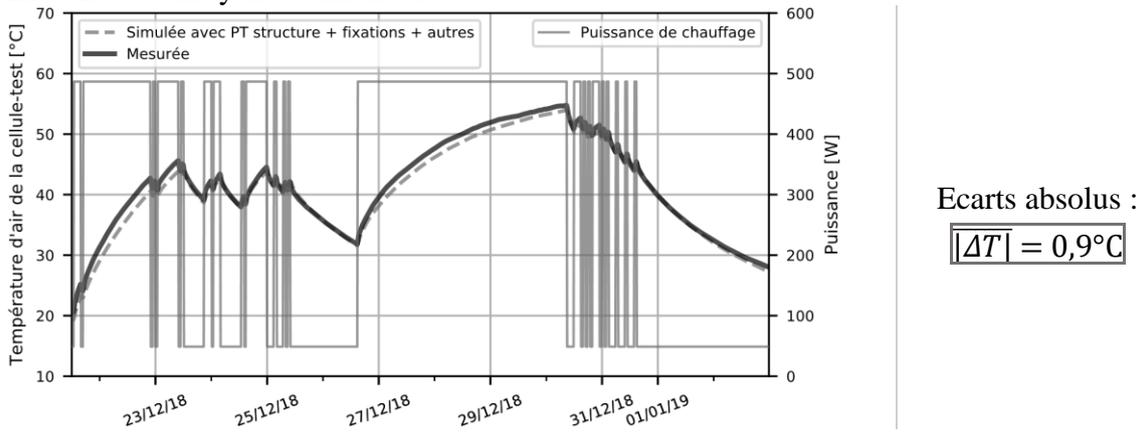


Figure 4 : Evolution de la température d'air de la cellule-test pour l'essai ROLBS

### 3.2. Le modèle simplifié : le modèle RC

Les modèles simplifiés sont des modèles de type RC. Ces modèles thermiques dynamiques peuvent être construits à partir de l'outil CTSM-R (Continuous-Time Stochastic Modelling dans le logiciel R) [7]. L'estimation des paramètres est réalisée par la maximisation de la fonction de vraisemblance, calculée comme le produit des probabilités conditionnelles de mesurer la température à l'instant  $t$  sachant la température à l'instant  $t-1$  et sachant les paramètres à identifier. L'algorithme utilisé est la méthode quasi-Newton.

Afin de choisir le modèle le plus approprié, c'est-à-dire, le modèle permettant de décrire au mieux le phénomène observé expérimentalement en évitant le surapprentissage comme expliqué dans [8], la méthode décrite dans [9] a été utilisée. Elle consiste à étudier des modèles simplifiés de complexité croissante. Les paramètres de chaque modèle sont estimés à l'aide de l'outil CTSM-R en maximisant la fonction de vraisemblance. Le modèle conservé est le modèle pour lequel la fonction de vraisemblance est la plus grande. De plus, les résidus obtenus doivent être indépendants et identiquement distribués [10].

Le modèle sélectionné dans le cas de la paroi opaque fortement isolée avec la méthode décrite ci-dessus est présenté en Figure 5. L'intérieur de la cellule est représenté par un nœud d'air ( $T_i$ ) et une capacité interne ( $C_i$ ). Le chauffage (et les gains divers) est modélisé par un générateur de courant ( $P$ ). L'environnement extérieur est montré comme un générateur de tension ( $T_e$ ), tout comme l'air de la garde thermique entourant la cellule-test ( $T_{TG}$ ). Les échanges entre l'intérieur de la cellule et l'extérieur sont vus comme deux résistances en série ( $R_{f1}$  et  $R_{f2}$ ) et une capacité ( $C_f$ ). Les échanges entre l'intérieur de la cellule et la garde sont représentés par deux résistances en série ( $R_{c1}$  et  $R_{c2}$ ) et une capacité ( $C_c$ ). La capacité interne de la cellule-test,

notée  $C_i$ , a été fixée à  $750 \text{ kJ.K}^{-1}$  dans l'étude après estimation de la capacité de chacun des équipements présents dans la cellule (air, poutres, réseau hydraulique...).

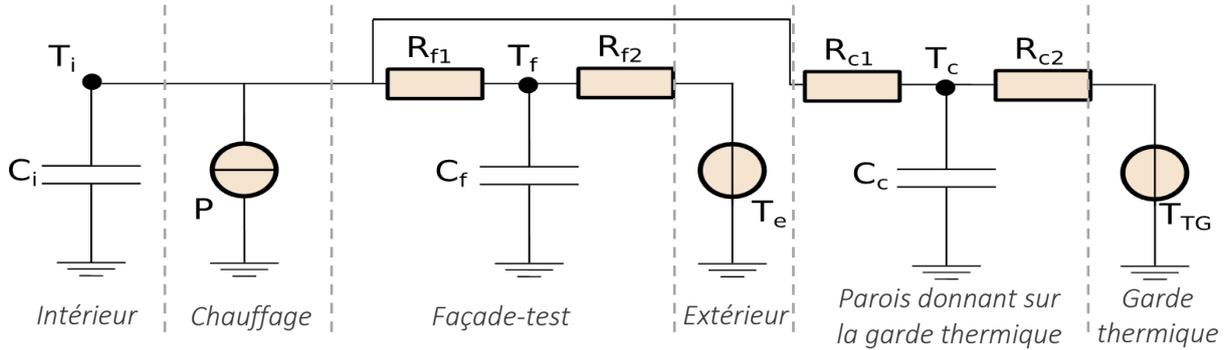


Figure 5 : Modèle simplifié de la cellule-test

#### 4. Identification des paramètres du modèle simplifié

L'estimation des paramètres du modèle RC présentée en Figure 5 a été réalisée à partir de plusieurs cas de référence : les données expérimentales des *essais ROLBS* et *Créneau* et les données simulées par le modèle thermo-aéraulique, représentées sur la Figure 3 et la Figure 4.

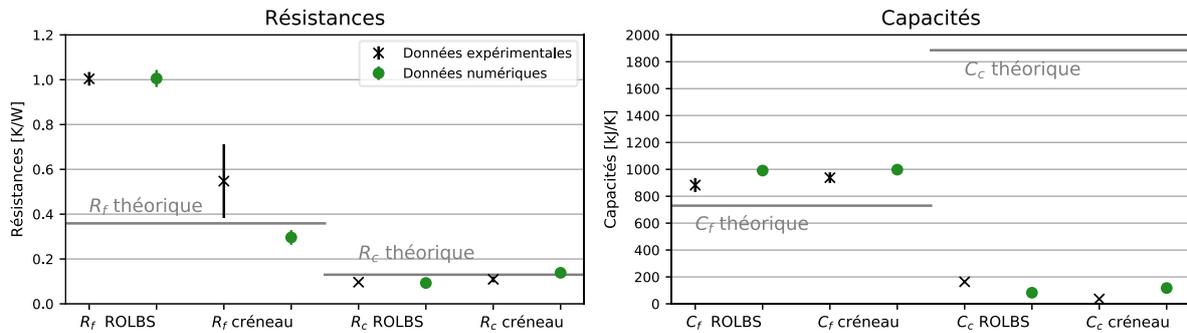


Figure 6 : Identification des paramètres du modèle simplifié – estimations, incertitudes et comparaison aux valeurs théoriques

Les paramètres suivants ont été estimés : les résistances totales  $R_f = R_{f1} + R_{f2}$  et  $R_c = R_{c1} + R_{c2}$ , et les capacités associées  $C_f$  et  $C_c$ . Les résultats et leurs incertitudes sont présentés sur la Figure 6 et comparés aux valeurs théoriques calculées en tenant compte des transferts par conduction et les infiltrations. Les capacités théoriques estimées sont les capacités théoriques totales. Or, les capacités estimées par identification sont les capacités efficaces [11]. Les estimations sont éloignées des valeurs théoriques dans tous les cas. Le cas traitant des données numériques de l'*essai Créneau* donne les résultats les plus proches des valeurs théoriques mais il semble impossible d'estimer tous les paramètres en même temps.

Les déperditions thermiques de la cellule-test peuvent être caractérisées par le coefficient de déperditions thermiques total, noté *HLC* pour « *Heat Loss Coefficient* », défini dans [12]. Il est facilement calculé à partir des valeurs théoriques de  $R_f$  et  $R_c$  en fonction du rapport entre la moyenne de la différence de température entre l'air de la cellule-test ( $T_i$ ) et l'air de la garde thermique ( $T_{TG}$ ) et la moyenne de la différence de température entre l'air de la cellule ( $T_i$ ) et l'air extérieur ( $T_e$ ), noté  $x$ . A partir du bilan thermique de la cellule-test en conditions statiques et du modèle détaillé présenté en Figure 5, on peut écrire :

$$P = \frac{1}{R_f} (\overline{T_i - T_e}) + \frac{1}{R_c} (\overline{T_i - T_{TG}}) = HLC (\overline{T_i - T_e}) \text{ où } HLC = \frac{1}{R_f} + \frac{x}{R_c} \text{ et } x = \frac{\overline{T_i - T_{TG}}}{\overline{T_i - T_e}} \quad (1)$$

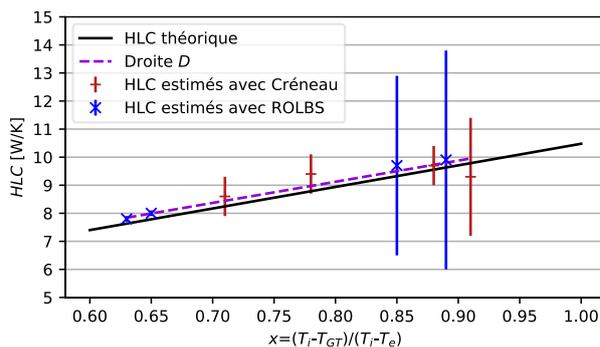
Afin d'estimer les résistances  $R_f$  et  $R_c$  par identification et calculer le coefficient *HLC*, différents jeux de données numériques ont été générés afin de traiter une grande variété de

conditions expérimentales. Pour cela, deux puissances de chauffage ont été utilisées (350 et 500 W), deux dynamismes de chauffage différents comme décrits précédemment (*Créneau* et *ROLBS*) et différentes conditions extérieures et intérieures décrivant différentes valeurs pour le ratio  $x$ . Le Tableau 1 présente les cas d'études et les résultats comparés aux valeurs théoriques. Contrairement aux résistances, les estimations des *HLC* sont proches de la valeur théorique.

Critères	Cas d'étude (issus de données simulées)					
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Dynamisme	Créneau	Créneau	Créneau	ROLBS	ROLBS	ROLBS
Puissance [W]	500	350	500	500	350	350
$x = \frac{T_i - T_{TG}}{T_i - T_e}$	0,91	0,71	0,78	0,89	0,65	0,85
Ecart relatif des paramètres estimés par identification comparés aux valeurs théoriques						
Ecart relatif de <i>HLC</i>	- 5 %	+ 5 %	+ 7 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 4 %
Ecart relatif de $R_f$	+ 279 %	-12 %	+ 1 %	+ 82 %	+ 180 %	+ 6 %
Ecart relatif de $R_c$	- 18 %	0 %	- 10 %	- 19 %	- 29 %	- 7 %

Tableau 1 : Impact du scénario sur l'estimation des résistances et du *HLC*

Le *HLC* théorique et les *HLC* estimés dans les cas de référence et les cas d'études en fonction du ratio  $x$  sont tracés sur la Figure 7. A l'aide d'une régression linéaire et de l'équation 1, il est possible de déduire les résistances  $R_f$  et  $R_c$ . Les résultats sont présentés à droite de la Figure 7. L'erreur d'estimation de  $R_c$  est de 2 % et l'erreur d'estimation de  $R_f$  est de -10 %.



Equation de la droite D :

$$HLC_{estimé} = \frac{1}{R_{f,estimé}} + \frac{x}{R_{c,estimé}}$$

avec :

$$R_{f,estimé} = 0,32 \text{ K/W}$$

$$R_{c,estimé} = 0,13 \text{ K/W}$$

Figure 7 : *HLC* estimés et *HLC* théorique en fonction des écarts de température

Il apparaît nécessaire de réaliser des essais expérimentaux pour différentes valeurs de  $x$ , donc, pour différentes valeurs de température intérieure car il est difficile de modifier la température de la garde thermique. Il semble que l'essai *ROLBS* soit meilleur pour l'estimation du *HLC* et donc des résistances  $R_f$  et  $R_c$ .

## 5. Conclusion

Dans cet article, un modèle thermo-aéraulique (modèle détaillé) d'une cellule-test a été calibré et validé. A partir de celui-ci et d'essais expérimentaux, l'estimation de paramètres d'un modèle RC (modèle simplifié) a été étudiée en fonction des conditions aux limites extérieures et intérieures. Tous les paramètres du modèle simplifié ne sont pas estimables en même temps. Il a donc été montré que les résistances peuvent être approchées à partir du calcul du coefficient de déperditions thermiques total. Il dépend des résistances du modèle simplifié et des conditions de l'essai qui sont exprimées par le rapport entre la moyenne de la différence de la température entre l'air de la cellule et l'air de la garde thermique et la moyenne de la différence de température entre l'air de la cellule et l'air extérieur. Il est nécessaire de réaliser plusieurs essais afin d'estimer les résistances. Les capacités doivent être estimées dans un second temps.

Différentes pistes d'améliorations sont nécessaires. D'une part, le modèle détaillé peut être amélioré en modélisant les ponts thermiques plus finement. D'autre part, d'autres modèles simplifiés peuvent être étudiés [3]. Enfin, la problématique de l'estimation de la capacité totale doit être abordée. Une fois ces modifications effectuées, cette méthode permettra de générer numériquement des essais et tester la méthode d'identification afin de définir les essais expérimentaux les plus pertinents afin de définir les performances thermiques d'une façade-test. La réalisation de ces essais restera nécessaire afin de valider le résultat obtenu.

## Références

- [1] European Commission, « Simplified energy balances - annual data ». 2019.
- [2] F. Favoino, R. Loonen, M. Doya, F. Goia, C. Bedon, et F. Babich, *Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades*, TU Delft Open. COST European Cooperation in Science and Technology, 2018.
- [3] S. Rouchier, M. Rabouille, et P. Oberlé, « Calibration of simplified building energy models for parameter estimation and forecasting: Stochastic versus deterministic modelling », *Building and Environment*, vol. 134, p. 181-190, avr. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.043.
- [4] H. Madsen *et al.*, « Thermal Performance Characterization using Time Series Data », *IEA EBC Annex 58 Guidelines*, p. 84, janv. 2015.
- [5] I. Khalifa, L. Gharbi Ernez, E. Znouda, et C. Bouden, « Coupling TRNSYS 17 and CONTAM: simulation of a naturally ventilated double-skin façade », *Advances in Building Energy Research*, vol. 9, n° 2, p. 293-304, 2015, doi: 10.1080/17512549.2015.1050694.
- [6] K. Martin, A. Campos-Celador, C. Escudero, I. Gómez, et J. M. Sala, « Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility », *Energy and Buildings*, vol. 50, p. 139-149, juill. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.028.
- [7] « CTSM-R Version 1.0.0 ». CTSM-R Development Team, avr. 07, 2015.
- [8] T. Hastie, R. Tibshirani, et J. Friedman, *Elements of Statistical Learning: data mining, inference, and prediction. 2nd Edition*. Springer, 2009.
- [9] P. Bacher et H. Madsen, « Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 7, p. 1511-1522, juill. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005.
- [10] J. D. Cryer et K.-S. Chan, *Time Series Analysis: With Applications in R*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [11] A.-H. Deconinck, « Reliable thermal resistance estimation for building components from on-site measurements », PhD thesis, KU leuven, 2017.
- [12] S. Juricic, P. Bacher, J. Goffart, S. Rouchier, A. Fouquier, et G. Fraisse, « Identifiability of the heat transfer coefficient in buildings with unheated spaces », *Proceedings of Building Simulation 2019*, Rome, sept. 2019.

## Remerciements

Les activités ont été réalisées dans le cadre du projet de recherche "CITEE – Composants InnovanTs pour les Enveloppes des bâtimEnts", financé par l'Union Européenne et la région Nouvelle-Aquitaine en partenariat avec la Plateforme TIPEE et EDF R&D. Les auteurs souhaitent également remercier Michel Burlot, David Gaillard et Laurent Servant pour leurs contributions au travail expérimental.