Mesure et identification des propriétés thermiques d'un système d'enveloppe bio-inspiré dynamique par une méthode d'optimisation

Tessa Hubert*[1-3], Baptiste Durand-Estebe[1], Antoine Dugué[1], Tingting Vogt-Wu[2], Denis Bruneau[3]

[1] NOBATEK/INEF4, Institut National pour la Transition Energétique du Bâtiment, 64600 Anglet, France,
[2] Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), UMR CNRS 5295, Université de Bordeaux, 33400 Talence, France,
[3] Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et Paysage de Bordeaux, 33405 Talence, France

***thubert@nobatek.inef4.com**

RESUME. Parmi les approches de conception innovantes émergentes, l'inspiration du vivant appelée « bio-inspiration » promet dans la littérature et sur le terrain des systèmes d'enveloppe de bâtiment plus performants, économes en ressources et durables. Dans cette optique, nous avons proposé et prototypé un concept d'enveloppe basé sur une hybridation de modèles biologiques. Ce système dynamique avec des propriétés de surface thermochromiques permet la gestion adaptative des apports d'air, de lumière et de chaleur à travers une paroi opaque. Une version de 1 m² a été intégré à un banc d'essai monitoré placé dans des conditions climatiques réelles. Afin de quantifier son impact sur les parois, le système a été décrit sous la forme d'un modèles RC de type boite grise avec quatre paramètres à identifier. Ceux-ci ont ensuite été optimisés par algorithmes à évolution différentielle, incluant d'autres paramètres identifiés comme ayant une forte influence sur l'erreur des modèles à travers une étude de sensibilité. Ce papier présente la série de mesures réalisées sur le système bio-inspiré et sa caractérisation via la calibration de ses paramètres.

MOTS-CLÉS : analyse de sensibilité, optimisation, conception bio-inspirée.

ABSTRACT. Among the emerging innovative design approaches, the inspiration of the living called "bio-inspiration" promises in the literature and in the field more efficient, resource efficient and sustainable building envelope systems. With this in mind, we have proposed and prototyped an envelope concept based on a hybridization of biological models. This dynamic system with thermochromic surface properties allows the adaptive management of air, light and heat gains through an opaque wall. A 1 m² version has been integrated in a monitored test bench placed in real climatic conditions. In order to quantify its impact on the walls, the system was described in the form of grey box RC models with four parameters to be identified. These were then optimized by differential evolution algorithms, including other parameters identified as having a strong influence on the models' error through a sensitivity study. This paper presents the series of measurements performed on the bio-inspired system and its characterization through the calibration of its parameters.

KEYWORDS: sensitivity analysis, optimization, bio-inspired design.

1. INTRODUCTION

Les travaux ici présentés ont exploré la chaine du processus de conception d'un système bio-inspiré pour l'enveloppe du bâtiment avec pour objectif final l'évaluation d'un système d'enveloppe adaptatif. De cette démarche a émergé un principe innovant capable de gérer les apports de chaleur, d'air, et de lumière. Une version pour la gestion de transferts thermiques a été intégrée dans un banc d'essai qui offre des conditions proches du réel. Le système proposé présente des phénomènes physiques complexes à décrire via à un modèle descriptif compet ; aussi, un modèle boite grise, couplé à une analyse de sensibilité puis à l'optimisation de ses paramètres, a été utilisé pour sa caractérisation. La partie expérimentale et la modélisation sont présentés dans cet article.

2. DESCRIPTION DU CONCEPT TESTE

Le concept étudié est inspiré du papillon morpho – lépidoptère de la classe insecte – qui présente des caractéristiques variées au niveau de ses ailes (convection forcée, orientation pour échanges radiatifs avec l'environnement, émissivité variable (Van Hooijdonk, Berthier, et Vigneron 2012)), et du caméléon – squamate de la classe reptile – connu pour ses changements de couleur dus à la déformation d'un réseau cristallin contenu dans son derme (Teyssier et al. 2015). Le principe retenu est une membrane à la fois déformable, tel que le réseau cristallin du caméléon, et déployable, via une multitude d'éléments orientables comme les ailes du morpho (Hubert et al. 2022). Outre cette adaptabilité aux transfert d'air, lumière et chaleur (Figure 1a), il est également auto-réactif à l'aide d'un revêtement dont le coefficient d'absorption change avec la température. Un tel système peut être envisagé devant une paroi, un vitrage, voire même en tant qu'enveloppe intégrale, et pourrait selon les configurations qu'on lui attribue (déformation plus ou moins importante, ouverture de clapets) ainsi protéger le bâtiment de fortes chaleurs.

Pour évaluer séparément la contribution du déploiement et de la déformation, une première version de prototype non déformable mais constituée de clapets orientables, appelée STEGOS, a été réalisée (Figure 1b). Des clapets aluminium colorés par une peinture thermochromique ont d'abord permis une validation visuelle de l'auto-réactivité attendue.

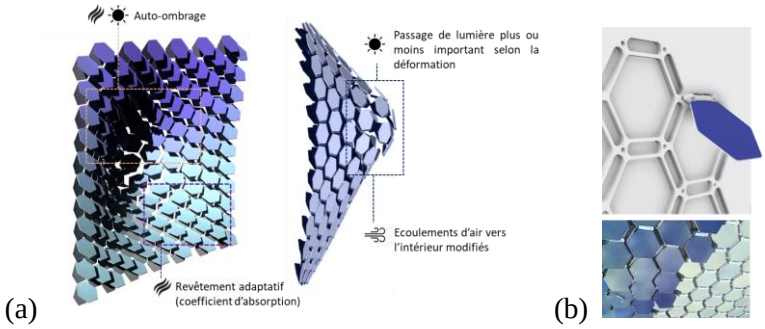


Figure 1 : (a) Principe déformable et déployable, (b) Prototype déployable thermochromique avec un revêtement formulé par OliKrom pour passer du bleu au blanc au-delà de 45°C.

3. MESURES EN CONDITIONS REELLES

Afin de mettre en avant les phénomènes physiques liés au transfert de chaleur au niveau du prototype, un banc mobile d'un volume d'1 m^3 (Figure 2) permettant une mesure à échelle 1:1 et en conditions climatiques réelles a été conçu pour intégration du prototype. Cette « boite-test » est composée de cinq

parois isolées, et d'une paroi interchangeable afin d'y installer le système testé. Le prototype, constitué de clapets orientables fixés à deux plaques aluminium (une perforée, et une pleine) a été installé devant une paroi opaque (bois contre-plaqué et panneau polystyrène). Les clapets choisis pour les mesures et la modélisation présentés ici sont couverts d'une peinture noire classique pour une première évaluation du système. L'impact de la thermochromie des clapets bleus-blancs sera mesurée lors d'expérimentations futures, notamment en période estivale.

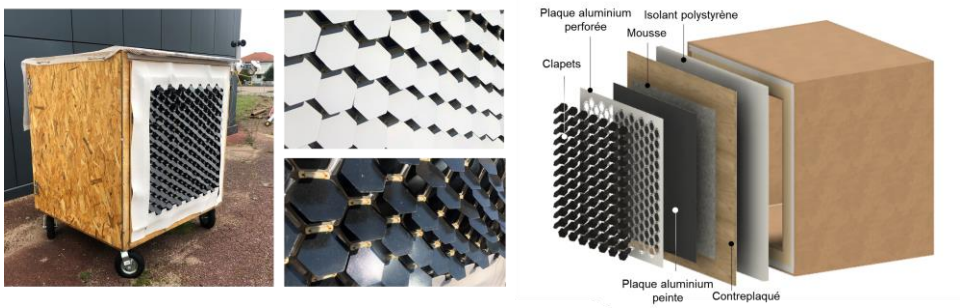


Figure 2 : Photographie et schématisation de la boite-test équipée de clapets.

3.1. BANC D'ESSAI ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Les conditions météorologiques ont été mesurées à l'aide des capteurs suivants : une sonde PT100 pour la température d'air extérieur, un anémomètre à coupelle pour la vitesse du vent, un pyranomètre SMP3 pour l'irradiation solaire incidente sur la surface testée. Aux différentes couches de la paroi testée des fluxmètres (en cuivre à gradients potentiels), équipés de thermocouples (type K) sont positionnés (Figure 3).

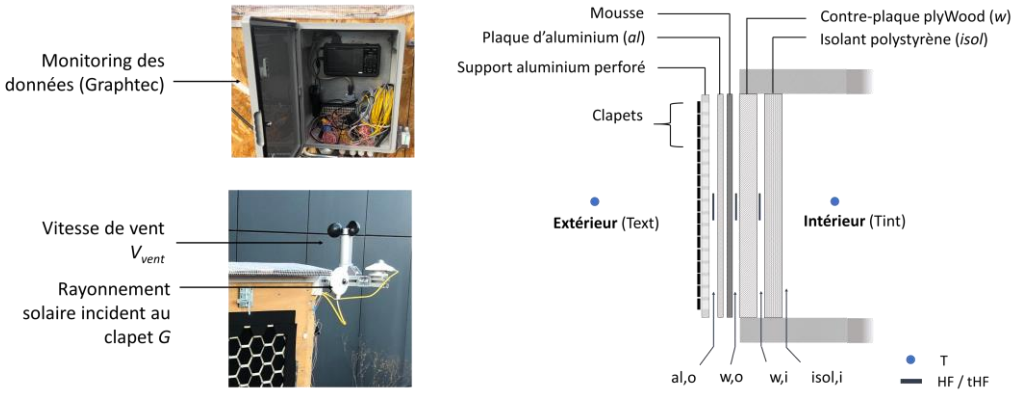


Figure 3 : Répartition et nomenclature des capteurs de température (« T » et « tHF ») et fluxmètres (« HF ») selon les couches de la façade testée (« al », « w », « isol », côté intérieur « i » ou extérieur « o »).

Des séries de mesures avec clapets noirs en position fermée (clapets positionnés à la verticale, angle de rotation de 0°) et ouverte (clapets positionnés en casquette, à 90°) ont été réalisées à Talence (Nouvelle Aquitaine, France), sur la boite-test orientée sud entre janvier 2022 et mars 2022. Pour chaque position, une campagne de mesures de 14 jours a été lancée, permettant de récolter des données par journées ensoleillées et nuageuses.

3.2. MESURES

Un extrait du jeu de données mesurées pour clapets fermés est présenté sur la Figure 4 pour une période de 3 jours :

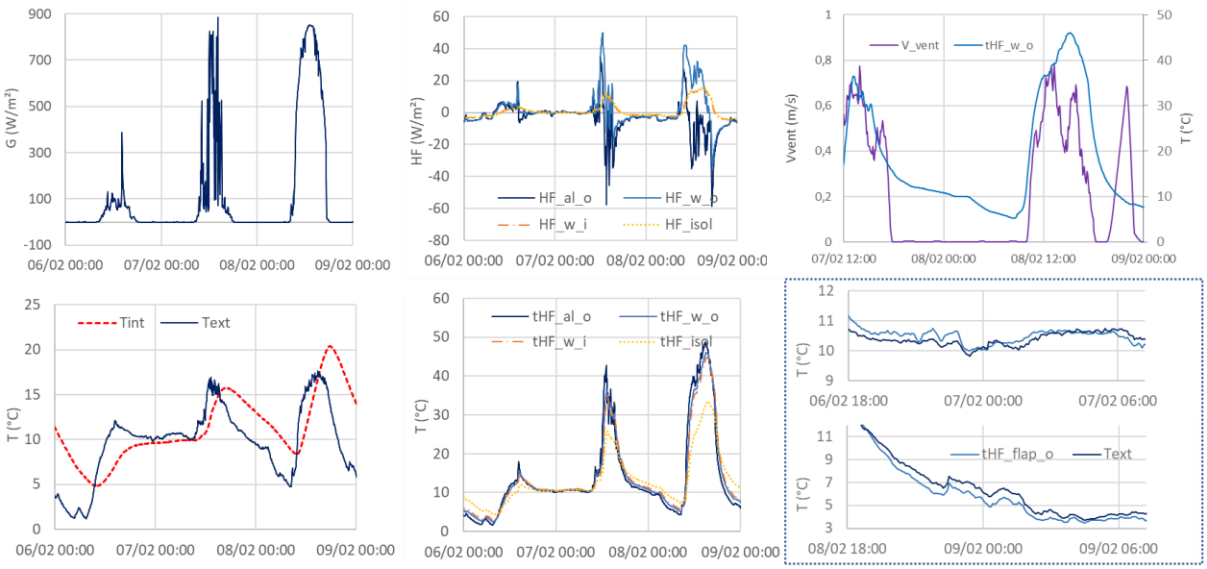


Figure 4 : Mesures réalisées entre le 06/02/2022 et le 09/02/2022. Boite-test orientée sud, angle des clapets = 0°.

Ces mesures indiquent un réchauffement de l'air intérieur fortement corrélé au rayonnement solaire. Les flux et températures mesurés aux différentes couches de la paroi évoluent de façon progressive, la partie contre-plaquée ayant un comportement proche des couches aluminium. Une corrélation entre la vitesse de vent et les variations au sein de la paroi est observable, notamment sur la température $T_{w,o}$ en cas de rayonnement solaire. En outre, en présence de vent, la température de surface des clapets extérieurs est supérieure à la température de l'air extérieur T_{ext} et en dessous autrement : nous pouvons ainsi supposer l'influence de l'échange radiatif avec la voûte céleste qui devient négligeable devant les échanges convectifs par nuit venteuse.

4. MODELISATION DE LA PAROI BIO-INSPIREE

Les mesures réalisées ont mis en évidence un comportement de paroi proche d'un collecteur solaire en journée, avec une décharge thermique rapide la nuit, et l'importance de prendre en compte la potentielle influence des échanges convectifs extérieurs en fonction de la vitesse de vent, et d'échanges radiatifs avec la voûte céleste.

4.1. MODELE RC PROPOSE

Nous considérons un échange monodirectionnel entre l'intérieur de la boite test et l'extérieur. Des prises d'images infrarouges sur les faces intérieures et extérieures confirment l'homogénéité et valident cette hypothèse. Le modèle RC proposé pour notre façade est présenté sur la Figure 5, avec h_i les coefficients de transfert thermiques ($R_i = 1/h_i$) et C_i les capacités thermiques des nœuds. Les conditions aux limites internes sont basées sur le flux thermique mesuré en surface de l'isolant. La condition limite externe est donnée par la mesure de la température ambiante, du rayonnement solaire normal à la paroi testée, et par une température de ciel calculée.

Le bilan d'énergie au nœud $T_{al,o}$ s'écrit ainsi :

$$\varphi_{sol,abs} + \varphi_{sol,indirect} + \varphi_{ciel,glo} + \varphi_{env,glo} + \varphi_{cc} = h_{al}.\left(T_{al,m} - T_{al,e}\right) \quad (1)$$

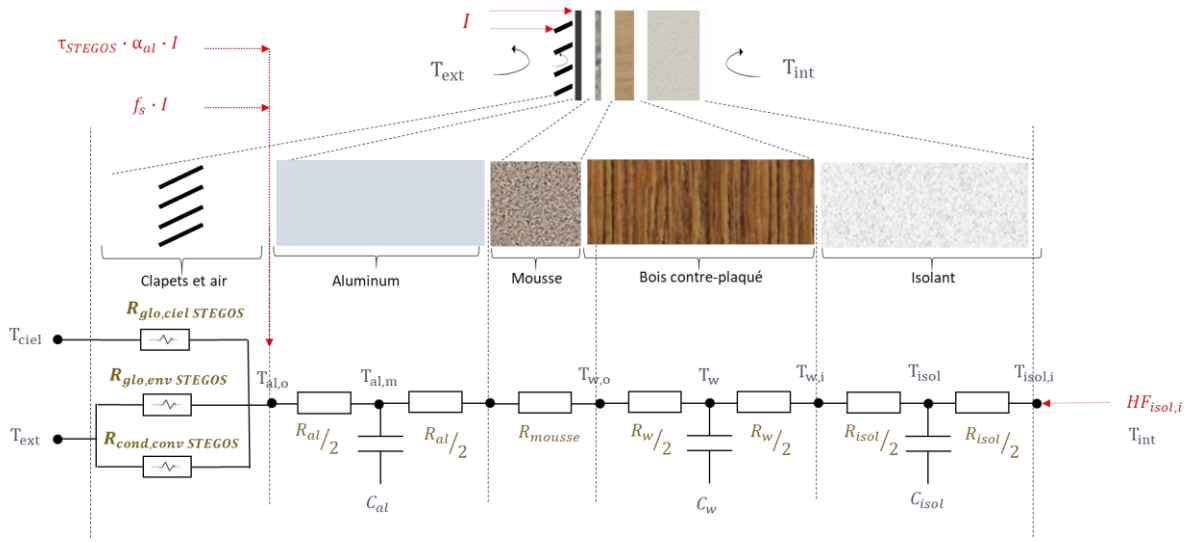


Figure 5 : Modèle RC de la paroi semi-infinie.

- Les termes associés aux flux solaires sont $\varphi_{sol,abs}$ la part transmise par le STEGOS et absorbée par l'aluminium, et $\varphi_{sol,indirect}$ la part résultante de l'absorption par les clapets :

$$\varphi_{sol,abs} = \tau_{Stegos} . \alpha_{al} . I \tag{2}$$

$$\varphi_{sol,indirect} = f_s . I \tag{3}$$

  τ_{STEGOS} [-] étant un rapport de lumière projetée calculé à l'aide de modèles géométriques (modélisation Rhinoceros Grasshopper) , α_{alu} [-] le coefficient d'absorption de l'aluminium, *I* [W/m²] le rayonnement total solaire normal à la paroi, et f_s [-] un facteur qui exprime la part solaire absorbée indirectement à travers les clapets du STEGOS. Notons que dans le cas où les clapets sont fermés, $\varphi_{sol,abs}$ est nul.

- Les densités de flux radiatif en grandes longueurs d'onde vers le ciel $\varphi_{ciel,glo}$ et vers l'environnement $\varphi_{env,glo}$ sont exprimées sous la forme développée des transferts radiatifs qui fait intervenir un coefficient d'échange variable, respectivement f_c [-] et f_{env} [-]. Ces facteurs englobent l'émissivité de l'aluminium et des facteurs de vue « équivalents » vers le ciel et l'environnement. Notons que pour ce dernier, la température prise est approximée à celle de la température extérieure. De même, pour les échanges radiatifs avec la voûte céleste, la température de ciel est calculée par l'équation de (Duffie et Beckman 2013).

- Pour le flux conducto-convectif entre l'air extérieur et la paroi, nous nous basons sur la formule donnée par (McAdams 1994), souvent reprise dans la littérature, qui introduit sous une forme affine une part fixe, et une part variable dépendant de la vitesse de vent. Nous utilisons la vitesse de vent mesurée localement V_{vent} [m/s] et faisons ici le choix de fixer le terme conducto-convectif indépendant du vent :

$$\varphi_{cc} = h_{cond,conv} . (T_{ext} - T_{al,o}) = (5{,}7 + f_v \cdot V_{vent}) \cdot (T_{ext} - T_{al,o}) \tag{4}$$

Avec les clapets en position fermée, le système STEGOS est donc caractérisé par 4 paramètres : un coefficient d'échange thermique conducto-convectif f_v, un facteur solaire f_s, un facteur radiatif céleste f_c, et un facteur radiatif vers l'environnement f_{env}.

Le modèle a été réalisé sous OpenModelica. Les caractéristiques des matériaux utilisés pour notre modèle sont indiquées dans le Tableau 1.

	Epaisseur e [mm]	Conductivité λ [W/(m.K)]	Masse volumique ρ [kg/m³]	Capacité thermique C [J/K]	Résistance thermique R [K/W]
Aluminium	1	10	2700	2700	1ᵉ10-5
Mousse	4	0,06	20	80	0,667
Contreplaqué	10	0,13	450	4500	0,0769
Isolant	25	0,025	32.5	812,5	1

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes couches composant le prototype STEGOS intégrées dans le modèle.

5. OPTIMISATION

Les paramètres incertains du modèle ont été calibrés à l'aide d'algorithmes à évolution différentielle minimisant une fonction d'erreur que nous choisissons pour cette étude comme étant l'erreur quadratique sur $T_{w,o}$ entre le modèle et la mesure.

5.1. ANALYSE DE SENSIBILITE

Afin de mieux évaluer l'influence des paramètres sur le modèle, nous réalisons une analyse de sensibilité dans laquelle nous intégrons non seulement les paramètres incertains, mais aussi les paramètres dont nous connaissons a priori la valeur. Afin de réduire nos temps de calcul, et le nombre de paramètres étant assez élevé, un premier screening utilisant la méthode de Morris (Morris 1991) est appliqué sur le jeu de données de trois jours consécutifs présenté en Figure 4. Les 4 paramètres incertains sont bien les 4 paramètres prépondérants (Figure 7a). Ils sont ensuite isolés comme seuls paramètres variables dans une analyse de Sobol (Sobol′ 2001) nous permettant ainsi de classer de façon plus fine leur influence sur l'erreur du modèle (Figure 7b).

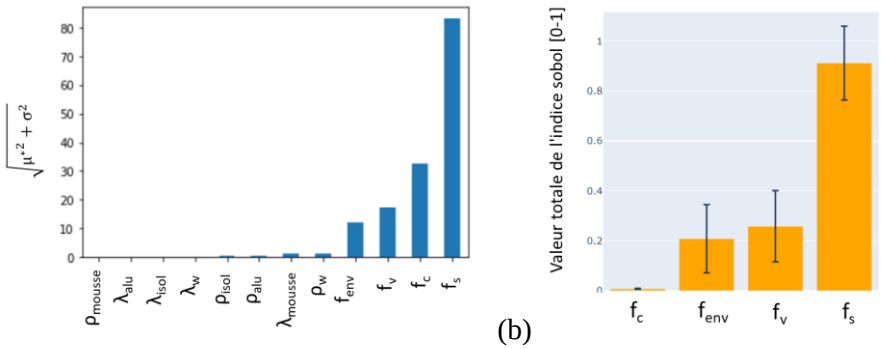


Figure 7 : (a) Distance euclidienne entre les deux indices (μ_i^*, σ_i) calculés par la méthode de Morris, (b) Estimation des indices de Sobol sur les 4 paramètres à identifier. La somme des indices vaut 1.39, avec 2400 échantillons.

Les paramètres aux indices les plus élevés sont le facteur solaire et le coefficient du vent. Si le facteur solaire n'intervient a priori qu'en journée, les autres paramètres ont également un impact dynamique sur l'erreur du modèle ; l'impact de f_c dépend par exemple de la nébulosité, et f_v de la vitesse de vent.

Une analyse de sensibilité dynamique a été réalisée pour pointer les périodes auxquelles les paramètres à identifier sont prépondérants sur l'erreur du modèle (Figure 8a). Théoriquement, il serait possible de réaliser une identification séquentielle où à chaque paramètre la plage considérée est

restreinte à la période de plus forte influence. Ici, d'abord f_{env} et f_c sur la période (A), puis f_v sur la période (B) et enfin f_s sur la période (C). Afin de reconsidérer le problème dans sa totalité, une dernière identification peut être faite sur la base des valeurs trouvées de manière séquentielle avec des plages de valeurs possibles restreintes. Cependant, un tracé de toutes les simulations de $T_{w,o}$ faites avec l'analyse sensibilité indique une sous-estimation systématique de la température prédite, et ce pour toutes les valeurs possibles des paramètres du modèles (Figure 8b). L'optimisation par partie n'est donc pas applicable dans ce cas et cet écart indique une erreur du modèle ou plus probablement de la mesure qu'il reste à résoudre. Ces résultats seront exploités dans de futurs travaux.

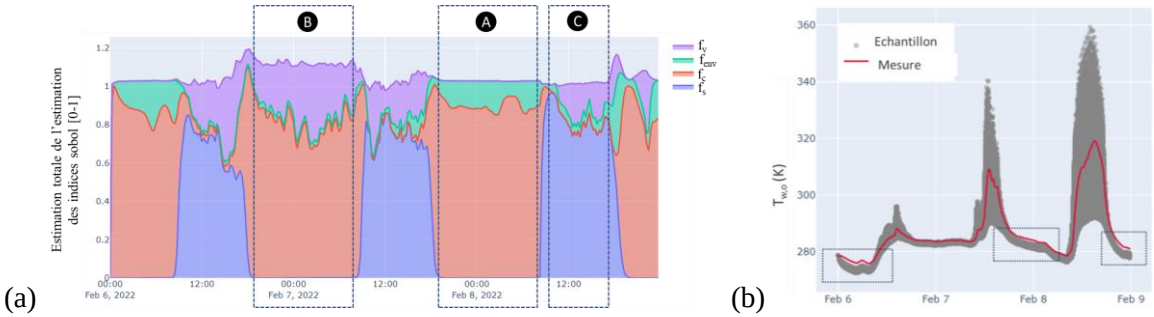


Figure 8 : (a) Analyse de sensibilité dynamique et plages possibles pour les optimisations par partie sur l'erreur moyenne de $T_{w,o}$, (b) Comparaison entre mesure et simulations de l'analyse de sensibilité ; les parties encadrées indiquent une sous-estimation des prédictions.

5.2. IDENTIFICATION DES PARAMETRES

L'identification des 4 paramètres sur les 3 jours consécutifs sélectionnés mène aux résultats présentés dans le Tableau 2.

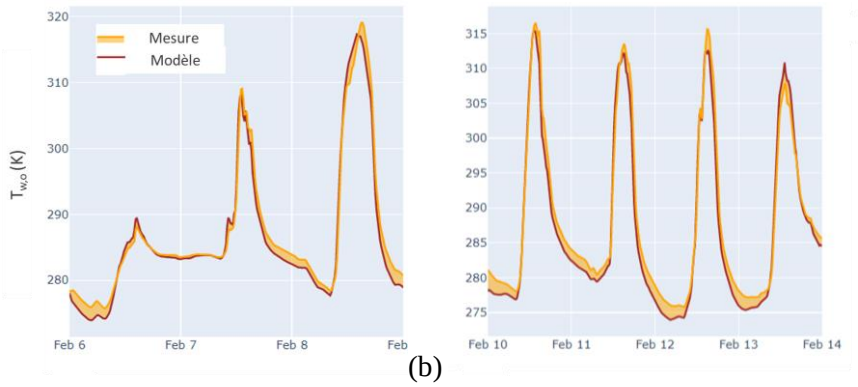
Paramètre	Unité	Valeur optimisée	Calibration (06/02 – 09/02)		Période de validation (10/02 – 14/02)	
			NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)
f_s	[-]	0,16	0,24 %	0,65 %	0,38 %	0,86 %
f_v	[W.s/(m^3.K)]	0,020				
f_c	[-]	0				
f_{env}	[-]	0,0013				

Tableau 2 : Valeurs des paramètres incertains après optimisation et erreurs associées.

Un facteur solaire f_s de 0,16 traduit que, malgré la fermeture des clapets, 16% du flux solaire incident est absorbé par la couche d'aluminium. Le facteur f_v lié à la vitesse de vent de 0,02 est à comparer à l'indice proposé par (McAdams 1994) de 3,4, ce qui traduit la protection au vent apporté par les clapets. Pour autant le premier indice fixe de la forme affine devrait aussi être recalculé (Eq. (4)). En revanche, les algorithmes d'optimisation minimisent le facteur céleste, quelles que soient les conditions initiales, suggérant une contribution des échanges radiatifs avec la voûte céleste qui ne serait que source d'erreur dans notre modèle. Le facteur d'échanges radiatifs avec l'environnement indique une valeur très faible de 0,0013. La Figure 9 présente les températures prédites et mesurées sur la plage d'optimisation, et une plage de validation de 4 jours consécutifs. Les erreurs moyennes (NMBE) et quadratiques (CV(RMSE)) indiquées dans le Tableau 2 semblent acceptables mais confirment une sous-estimation du modèle.

L'approche proposée introduit 4 paramètres à identifier, tous en lien avec les échanges sur la face extérieure du prototype. Leur identification semble alors complexe. La proposition d'intégrer la plage

de précision de la mesure doit permettre de prendre en compte cette incertitude et ainsi de pouvoir appliquer l'identification par partie proposée.



(a) (b)

Figure 9 : Mesure et modèle pour (a) la période d'entrainement et (b) la période de validation.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un prototype dérivé d'une démarche bio-inspirée a été intégré à un banc de mesure, testé et caractérisé. Si l'approche classique d'optimisation sur une période de trois jours donne des résultats satisfaisants, l'utilisation d'une calibration par partie sur la base d'une analyse de sensibilité dynamique a montré des limites. Le modèle peut être discuté sur son périmètre, la modélisation de l'erreur elle-même ou plus probablement la mesure et notamment la précision des capteurs de température. L'utilisation prochaine de méthodes d'inférences bayésiennes devrait pouvoir palier à ce problème. Par ailleurs, la caractérisation proposée a été réalisée dans une configuration avec clapets fermés, et devra être confrontée à d'autres mesures ; dans un premier temps à une configuration clapets noirs ouverts, dont les phénomènes physiques en surface extérieure devraient différer au niveau des échanges radiatifs et convectifs, puis à d'autres couleurs de revêtement, et notamment le revêtement thermochromique dont le coefficient d'absorption sera fonction de sa température.

7. BIBLIOGRAPHIE

Duffie, John A., et William A. Beckman. 2013. *Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman*. 4th ed. Hoboken: John Wiley.

Hubert, Tessa, Antoine Dugué, Tingting Vogt Wu, Fabienne Aujard, et Denis Bruneau. 2022. « An Adaptive Building Skin Concept Resulting from a New Bioinspiration Process: Design, Prototyping, and Characterization ». *Energies* 15 (3): 891. https://doi.org/10.3390/en15030891.

McAdams, W.H. 1994. *Heat Transmission*. 3rd Edition. New York: McGraw- Hill.

Morris, Max D. 1991. « Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments ». *Technometrics* 33 (2): 161-74. https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804.

Sobol′, I.M. 2001. « Global Sensitivity Indices for Nonlinear Mathematical Models and Their Monte Carlo Estimates ». *Mathematics and Computers in Simulation* 55 (1-3): 271-80. https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6.

Teyssier, Jérémie, Suzanne V. Saenko, Dirk van der Marel, et Michel C. Milinkovitch. 2015. « Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons ». *Nature Communications* 6 (1): 6368. https://doi.org/10.1038/ncomms7368.

Van Hooijdonk, Eloise, Serge Berthier, et Jean-Pol Vigneron. 2012. « Contribution of Both the Upperside and the Underside of the Wing on the Iridescence in the Male Butterfly *Troïdes Magellanus* (Papilionidae) ». *Journal of Applied Physics* 112 (7): 074702. https://doi.org/10.1063/1.4755796.