

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMIQUES EQUIVALENTES D'UNE PAROI COMPLEXE INTEGRANT UN PRODUIT MINCE REFLECHISSANT (PMR) A L'AIDE DE SIMULATIONS DYNAMIQUES

Frédéric Miranville Harry Boyer François Garde Franck Lucas
Laboratoire de Génie Industriel
Université de La Réunion
frederic.miranville@univ-reunion.fr

RÉSUMÉ

Les produits minces réfléchissants (PMR) sont utilisés en isolation thermique des parois de bâtiments et se présentent sous la forme de membranes fines dont les faces sont recouvertes d'un dépôt d'aluminium. De plus en plus utilisés en construction de bâtiments neufs ou en réhabilitation, ils n'offrent cependant en France aucune garantie de performance thermique. En effet, compte tenu de leur constitution spécifique, ils n'entrent pas tous dans le cadre de la définition normalisée des produits dits isolants thermiques et ne peuvent en conséquence faire l'objet d'une procédure de certification.

Afin de déterminer la résistance thermique d'un complexe de toiture intégrant ce type de produit et répondre ainsi à la problématique réglementaire associée, une méthodologie s'articulant autour de simulations en régime dynamique est mise en œuvre. Cette dernière est basée sur l'élaboration d'un modèle détaillé d'une cellule d'essai en environnement réel. La procédure de validation expérimentale engagée afin de vérifier la pertinence du modèle permet alors d'identifier un modèle simplifié et par la même les caractéristiques thermiques souhaitées.

INTRODUCTION

Sous les climats chauds, il est nécessaire de lutter contre les apports solaires afin d'obtenir des conditions de confort thermique dans les bâtiments et minimiser le recours à des dispositifs actifs de production de froid. Ces derniers sont en effet de forts consommateurs d'énergie électrique et leur généralisation, en particulier en situation insulaire, engendre des contraintes de production importantes.

Les sollicitations solaires concernent l'ensemble du bâtiment, mais sont plus accentuées au niveau de la toiture. Ainsi, afin de diminuer cet apport énergétique, plusieurs solutions sont envisageables, dont le recours à l'isolation thermique.

Les isolants thermiques utilisés traditionnellement sont dits « de masse » et possèdent une conductivité thermique très faible, de l'ordre de $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ils visent ainsi à réduire le transfert de chaleur par conduction. Les laines minérales et les mousses expansées (polyuréthane et polystyrène) en sont des exemples.

Cependant, ils sont destinés à lutter contre les apports conductifs et non contre le rayonnement thermique, mode de transfert de chaleur dont l'importance est à ne pas négliger, surtout pour des toitures présentant une couverture de type tôle et des lames d'air.

Des produits sont destinés à réduire cette part de transfert de chaleur et sont regroupés sous le terme générique de Produits Minces Réfléchissants (PMR). Ils se présentent sous la forme de membranes minces, dont les faces sont recouvertes d'un matériau à très faible émissivité, ce qui se traduit visuellement par un aspect poli et donc réfléchissant. De telles surfaces possèdent la propriété d'émettre très peu de rayonnement thermique en comparaison aux surfaces les plus courantes dans le domaine du bâtiment. Elles réfléchissent également une grande partie du rayonnement thermique de grande longueur d'onde qui leur parvient et permettent de ce fait de limiter significativement le transfert radiatif dans la paroi qui les contient. L'interface est constituée de couches faiblement conductrices de chaleur, en papier kraft ou en polyéthylène. Ces produits sont insérés en toiture entre la couverture et le plafond pour former un complexe de toiture.

Le principe de fonctionnement des PMR est lié à leurs faces réfléchissantes, dont la faible émissivité est à la base de leur efficacité. Elles permettent en effet de réfléchir environ 95% de l'énergie incidente et n'en absorbent que 5%. Pour ce faire, l'énergie doit être transmise par rayonnement aux PMR ; c'est la raison pour laquelle une lame d'air doit être contiguë aux faces réfléchissantes.

En climat de type tropical humide, tel celui de l'île de La Réunion, les sollicitations solaires sont importantes. De plus, les couvertures des toitures réunionnaises sont dans une large proportion faites de tôle et atteignent en saison estivale des températures élevées, de l'ordre de 70°C . Or l'énergie rayonnée par un matériau est d'autant plus importante que sa température est élevée, ce qui favorise le principe d'action des PMR pour de telles couvertures.

Cependant, compte tenu de leur constitution et de leur faible épaisseur (au maximum 1cm), les PMR ne sont pas tous définis comme des isolants thermiques selon la norme française NF P 75-101. En conséquence, ils n'entrent pas dans le cadre des procédures de certification par des

organismes de références. Leurs caractéristiques thermiques sont donc incertaines, ce qui laisse planer le doute et alimente la polémique sur leurs performances effectives par rapport à des isolants thermiques de masse. Cette problématique que l'on peut qualifier de « réglementaire » se traduit par une absence de caractéristiques thermiques fiables et associée à une dynamique forte des ventes de PMR met en évidence la nécessité d'aboutir à une quantification de leurs performances, en particulier en conditions réelles d'utilisation. Notons au passage que cette problématique ne s'applique pas dans les pays anglo-saxons, les PMR étant utilisés souvent en complément d'une isolation classique [3].

En outre, il n'existe pas à l'heure actuelle de réglementation thermique dans les départements d'outremer (elle est en cours de préparation). Des labels de qualité existent et garantissent une conception adaptée des bâtiments. Celui relatif aux performances énergétiques des bâtiments est le label ECODOM [1]. Dans ce cadre, des caractéristiques thermiques de produits utilisés dans le bâtiment sont indispensables.

Une précédente étude expérimentale en environnement naturel [6] a d'ores et déjà permis d'obtenir des données de référence pour des conditions climatiques caractéristiques de la saison chaude à La Réunion. La méthodologie alors utilisée était uniquement basée sur des mesures en environnement naturel afin de calculer le facteur de transmission solaire¹ et la conductance apparente d'un complexe de toiture standard incluant un PMR, tel que celui indiqué sur la Figure 1.

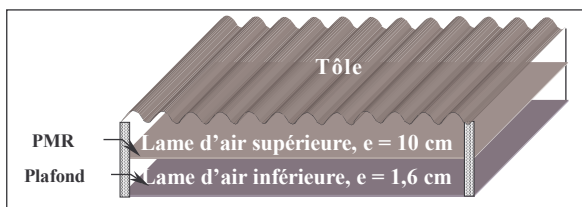


Figure 1: Description d'un complexe de toiture standard incluant un PMR

Pour une séquence du mois de février 2002, les moyennes obtenues sur une journée type estivale sont celles du Tableau 1.

Facteur de transmission solaire FTS	0,055
Conductance apparente K_{app}	0,28 $W.m^{-2}.K^{-1}$

Tableau 1: Caractéristiques thermiques d'un complexe de toiture standard déterminées lors d'une étude expérimentale en février 2002

¹ Le facteur de transmission solaire est défini comme le rapport du flux solaire transmis par la toiture et du flux solaire incident

Pour l'étude présente, bien que la finalité soit en partie la même, la méthodologie est différente et basée sur des simulations en régime dynamique; sa description fait l'objet du paragraphe suivant. Toutefois, les valeurs précédentes constituent des données de référence.

MÉTHODOLOGIE

La démarche que nous nous proposons de mener afin d'atteindre les objectifs précités a pour point de départ la modélisation fine d'une cellule d'essai incluant un complexe de toiture standard avec PMR. Effectuée dans le but de mettre en évidence son comportement thermique en conditions climatiques réelles, notamment au travers d'une procédure de validation thermique globale, les déductions associées permettent de se pencher sur la question d'une modélisation simplifiée. La confrontation au modèle initial dont la validation a été préalablement obtenue fournit alors une référence permettant de juger de la pertinence du cheminement parcouru. Le synoptique de la Figure 2 propose une vision d'ensemble de la démarche.

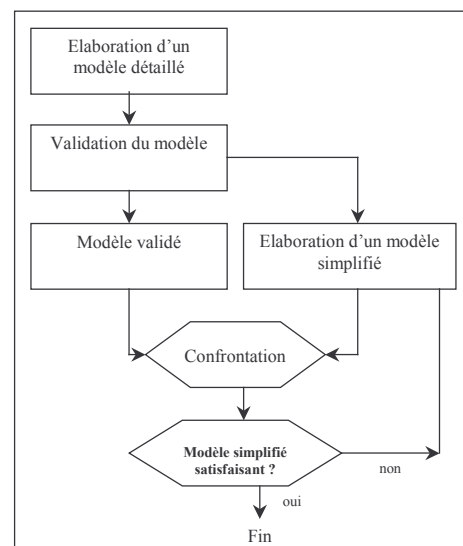


Figure 2: Synoptique de la méthodologie

La première étape indiquée ci-dessus constitue le préliminaire indispensable à l'aboutissement d'un modèle simplifié. Le modèle élaboré est destiné à traduire les phénomènes thermiques ayant lieu au sein d'une cellule d'essai en environnement naturel implantée sur la plateforme expérimentale de l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Pierre, la cellule LGI.

Ce support expérimental dispose d'un volume intérieur d'environ 29,8m³ et s'apparente de ce fait à une pièce classique de type chambre à coucher ou bureau. Elle est conçue suivant une structure modulable, ce qui permet au départ du même bâti de pouvoir étudier différentes configurations et différents phénomènes. Les parois sont à cet effet interchangeables.

Représentative d'un bâtiment de faibles dimensions, elle se compose de parois opaques verticales, d'un vitrage de type jalousie, d'une porte vitrée et d'un complexe de toiture intégrant un PMR. Le détail de la constitution de ces éléments est reporté dans le Tableau 2.

Elément	Constitution	Remarque(s)
Parois opaques verticales	Panneau sandwich 80mm fibrociment/polyuréthane/fibrociment	
Vitrage	Bâti aluminium, verre 8 mm clair	De type jalousies 0,8x0,8m
Porte vitrée	Bâti aluminium, verre 8 mm clair	Vitrage en partie haute et basse, 0.7x2.2m
Complexe de toiture	tôle ondulée en acier galvanisé/lame d'air 100mm/PMR de 8mm d'épaisseur/lame d'air 16mm/placoplâtre de 8mm	PMR constitué de faces en aluminium et d'une interface en polyéthylène
Plancher	Dalottes béton de 80mm d'épaisseur sur polystyrène de 60mm	

Tableau 2: Détails de la constitution de la cellule LGI

Elle est équipée d'une toiture standard, intégrant un PMR, installée en respectant les conditions de mise en œuvre des distributeurs. En outre, elle dispose d'une porte vitrée (vitrage haut et bas) et d'une jalousie en aluminium, comme illustré sur la Figure 3.



Figure 3: La cellule LGI

La cellule est orientée selon le nord géographique. La couverture de type tôle est de couleur sombre, ce qui favorise les sollicitations extrêmes. La cellule est en outre équipée d'une ventilation mécanique contrôlée et d'un système de traitement d'air, de type «split-system». Pour l'étape de validation expérimentale, les vitrages de la porte et celui de la jalousie ont été occultés.

L'enceinte de la cellule comporte des capteurs de température de surface sur chacune des faces (nord, sud, est et ouest, à l'intérieur comme à l'extérieur) et une prise de mesure de température d'air et de globe noir est effectuée à trois hauteurs différentes, afin d'être en mesure d'apprécier la stratification de l'air.

De plus, des capteurs de température sont scellés dans la dalle de béton supportant la cellule, ce qui donne des informations sur les conditions aux limites provenant du sol.

L'ensemble des températures est mesuré par des thermocouples de type T, plaqués sur les surfaces dans le cas d'une mesure de température de surface, insérés dans un cylindre en aluminium pour la mesure des températures d'air et insérés dans un globe noir pour la température de globe noir. Pour plus de détails sur la mise en œuvre des capteurs et les erreurs associées, se référer à [5].

Le complexe de toiture fait l'objet d'une instrumentation détaillée, intégrant les dispositifs de mesure des températures de surface de la tôle, du PMR et du plafond, ainsi que celles des pannes constituant la charpente. Les températures résultantes d'air et de globe noir des lames d'air sont également mesurées et des fluxmètres permettent d'obtenir les flux thermiques à travers la toiture, le PMR et le plafond. L'erreur absolue des thermocouples est estimée à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Les fluxmètres quant à eux fournissent des mesures entachées d'une erreur relative de 5%, selon les données constructeur.

La modélisation fine de la cellule a fait l'objet d'une précédente étude [4], dont les résultats les plus importants sont rappelés ci-après.

ETUDE PRELIMINAIRE – VALIDATION D'UN MODELE DETAILLE

Le préalable à la modélisation de la cellule LGI a été le développement d'un code de calcul spécifique. Ce dernier, développé sous l'environnement *MATLAB*, s'apparente à un code de simulation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments. Des développements spécifiques ont toutefois été entrepris afin de permettre la simulation de parois complexes intégrant des PMR. Ils ont porté sur les modèles radiatifs et convectifs, avec le souci d'une approche multimodèle. La méthode des radiosités est ainsi utilisée pour les transferts radiatifs de grandes longueurs d'onde et les transferts convectifs dans les lames d'air peuvent être décrits à l'aide de corrélations adimensionnelles ou de type.

Le modèle détaillé choisi pour traduire les phénomènes thermiques décompose la cellule en 6 macrovolumes ou zones comme indiqué sur la Figure 4, pour lesquelles des températures de surfaces et une température sèche d'air sont entre autres calculées. Ces indicateurs sont utiles pour la validation du modèle, en particulier lors de l'étape de validation expérimentale ou les prédictions du code de calcul sont comparées aux mesures. Il est à noter que la prise en compte du PMR est intrinsèque au modèle au travers de la constitution et de la faible émissivité des faces de la paroi de séparation entre les zones 3 à 6 et la zone 2. Par ailleurs, bien que la capacité thermique de cette paroi soit faible, le régime thermique global du bâtiment est retraduit de manière réaliste par les simulations dynamiques, nécessaires à une confrontation modèle/mesures.

La validation proprement dite du modèle s'appuie sur une méthodologie commune de validation au niveau international, comprenant deux catégories de tests, comme indiqué dans le Tableau 3.

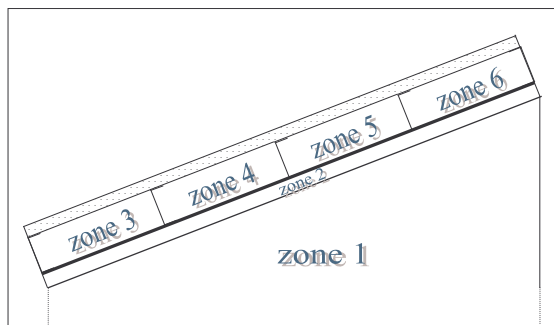


Figure 4: Modélisation multizone de la cellule LGI

La première, généralement dénommée phase de tests à priori, consiste en une vérification du code de calcul, depuis la théorie sous-jacente aux modèles élémentaires jusqu'à la vérification analytique, en passant par des comparaisons inter-logiciel.

Vérification de la théorie de base	Tests à priori
Vérification du bon fonctionnement numérique	
Comparaison inter-logiciels	
Vérification analytique des modèles élémentaires	
Analyse de sensibilité paramétrique	Tests à posteriori
Validation expérimentale	

Tableau 3: Méthodologie de validation globale

La seconde partie ou phase de tests à posteriori comporte deux points essentiels, l'analyse de sensibilité paramétrique et surtout la validation expérimentale. Cette dernière étape est fondamentale, car elle fait le lien avec la réalité par l'intermédiaire des mesures.

En outre, des critères de validités du modèle doivent être définis ; dans notre cas, ce sont les températures sèches d'air de chaque zone thermique notées respectivement $T_{ai,1}$, $T_{ai,2}$, ..., $T_{ai,6}$ pour les zones 1 à 6. Compte tenu du principe d'action des PMR qui se traduit par la minimisation des transferts radiatifs dans les lames d'air, les transferts convectifs régissent majoritairement le comportement thermique global du complexe de toiture, ce qui justifie le choix des indicateurs précédents. Par ailleurs, le modèle est jugé valide si les prédictions du modèle sont conformes aux mesures à 10% près, ce qui se traduit par les intervalles donnés dans le Tableau 4.

Zone	Critère de validité
Zone 1	$-1^{\circ} C \leq T_{ai,1} \leq +1^{\circ} C$
Zone 2	$-2^{\circ} C \leq T_{ai,2} \leq +2^{\circ} C$
Zone 3 à 6	$-4^{\circ} C \leq T_{ai,3 \text{ à } 6} \leq +4^{\circ} C$

Tableau 4: Intervalles de validité des prédictions du modèle

La méthodologie précédente, appliquée au cas de notre modèle détaillé a mené à sa validation, les prédictions du code de calcul satisfaisant les critères précédents. En particulier pour les zones 1 et 2, l'évolution des températures d'air est conforme, comme indiqué sur la Figure 5.

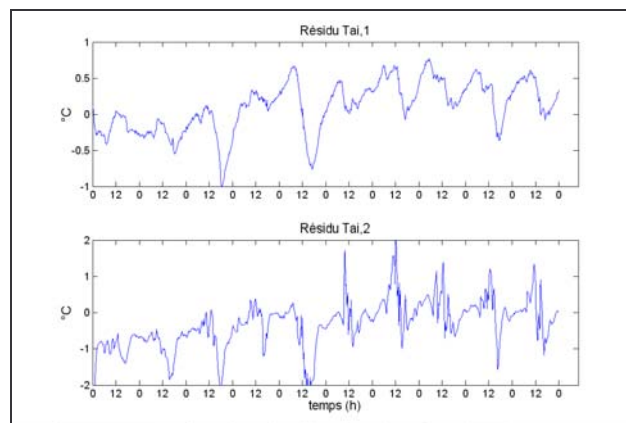


Figure 5: Résidus (mesure - modèle) des températures d'air des zones 1 et 2

Par ailleurs, suite à l'analyse de sensibilité paramétrique selon une méthode dérivée de la méthode FAST (*Fast Fourier Amplitude Transform*) [2] et à une étape de calibration du modèle, des déductions importantes ont pu être faites :

- Le comportement thermique global du complexe de toiture est régi en grande partie par les transferts convectifs dans la lame d'air inférieure, notamment au travers du coefficient d'échange convectif de face supérieure du plafond
- Ce coefficient, obtenu par une méthode d'optimisation, vaut $h_{ci} = 2,88 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- L'influence des éléments structurels de la charpente de la toiture (ponts thermiques) est faible sur son comportement thermique
- La prise en compte correcte du sol est indispensable à l'obtention de bons résultats, et semble corrélée à la prise en compte du rayonnement de grande longueur d'onde provenant de la voûte céleste au travers de la température de ciel

Ces informations ont été confirmées lors d'une phase de corroboration du modèle sur deux autres séquences expérimentales, l'une en conditions estivales (avril 2002) et l'autre en conditions hivernales (juin 2002).

VERS UN MODELE SIMPLIFIE

Fort des constats précédents et suite à la méthodologie évoquée précédemment, nous nous sommes orientés vers une simplification graduelle du modèle détaillé afin d'aboutir à un modèle simplifié satisfaisant.

La première simplification que nous avons opérée a été de supprimer les éléments traduisant les ponts thermiques dans le modèle initial ; comme escompté au vu des résultats de l'analyse de sensibilité paramétrique, les courbes donnant les différentes températures d'air des zones 1 à 6 ont peu varié, en moyenne de l'ordre de 0,5°C. Cette constatation a donc conforté cette première déduction.

Suite à l'analyse des courbes donnant l'ensemble des températures d'air des zones 3 à 6, représentant les fractions de la lame d'air supérieure délimitées par les pannes de la charpente, un comportement très similaire a été mis en évidence. Ceci, ajouté au fait que les frontières séparant ces différentes zones sont faites d'acier, bon conducteur de chaleur, laisse entrevoir la possibilité de globaliser ces quatre zones en une seule, de sorte à ramener le modèle initial de 6 zones à un modèle que l'on peut qualifier d'intermédiaire à 3 zones. La confrontation des températures d'air de ces zones à celle du modèle initial et celle issue des mesures est présentée sur les figures 6 et 7.

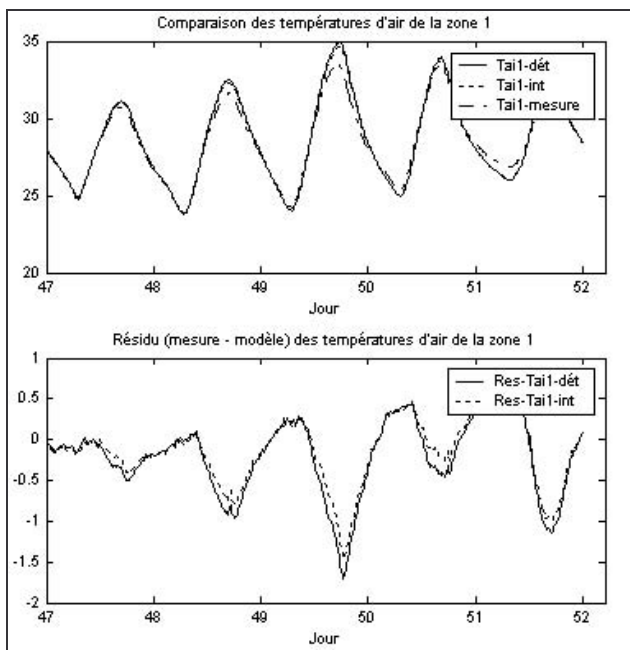


Figure 6: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, intermédiaire et les mesures dans l'enceinte de la cellule expérimentale

Comme on peut le constater, les évolutions sont très similaires et restent dans la marge d'erreur jugée acceptable. Les résidus (écarts mesure/modèle) présentés sont en effet inclus dans les intervalles de validité.

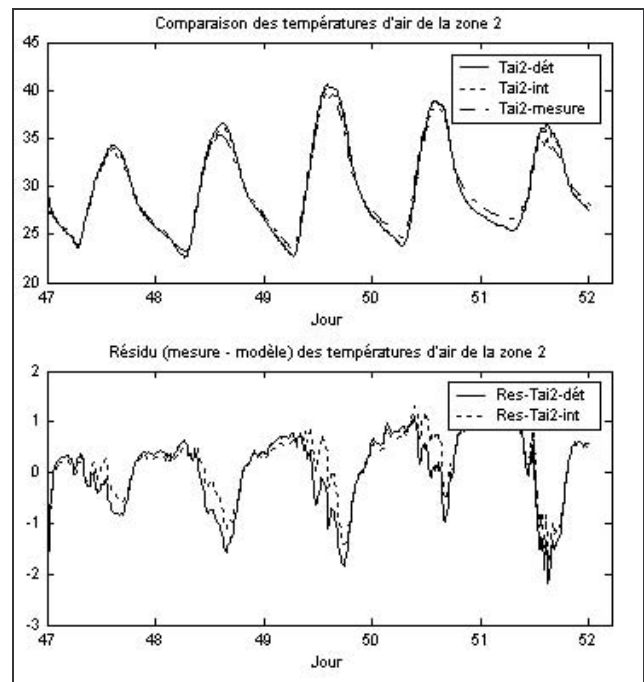


Figure 7: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, intermédiaires et les mesures dans la lame d'air inférieure du complexe de toiture

La globalisation des lames d'air supérieures en une seule est donc confortée par nos résultats. Nous sommes donc maintenant en mesure d'envisager au départ de ce nouveau modèle trizone des simplifications supplémentaires.

La configuration du complexe de toiture est en effet particulière compte tenu de l'intégration du PMR. Ce dernier nécessite pour être installé convenablement la présence de lames d'air. Par ailleurs, le transfert par rayonnement étant minimisé par les faces en aluminium du PMR, le mode de transfert convectif dans ces lames d'air devient prépondérant. Les deux lames d'air étant de surcroît chauffées en faces supérieure, le transfert convectif dont elles sont le siège s'apparente à de la conduction dans l'air. On peut donc raisonnablement envisager de considérer la paroi complexe que constitue la toiture comme une paroi multicouche de bâtiment dans laquelle le transfert thermique au niveau de chaque couche est uniquement conductif.

Cependant, la description thermique des couches se faisant au travers des conductivités thermiques des matériaux, se pose le problème de la détermination de ces valeurs pour les lames d'air supérieure et inférieure. Compte tenu de la connaissance des valeurs des coefficients d'échange convectifs (cf. : Figure 8), fixes au cours d'une simulation et issus de prospections bibliographiques [5], le calcul de résistances thermiques équivalentes peut être effectué.

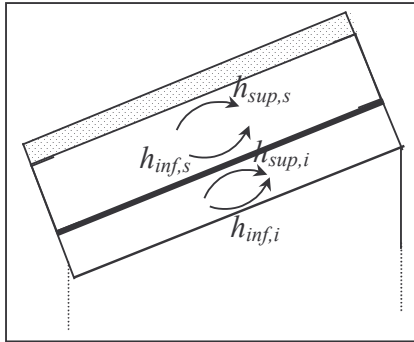


Figure 8: Coefficients d'échange des faces supérieure et inférieure des lames d'air du complexe de toiture

Ainsi, en appelant R_{sup} et R_{inf} les résistances thermiques équivalentes des lames d'air supérieure et inférieure, on peut écrire simplement :

$$\begin{cases} R_{sup} = \frac{1}{h_{sup,s}} + \frac{1}{h_{inf,s}} \\ R_{inf} = \frac{1}{h_{sup,i}} + \frac{1}{h_{inf,i}} \end{cases}$$

En tenant compte des épaisseurs respectives des lames d'air (e_{sup} et e_{inf}), on peut ainsi déterminer une conductivité thermique équivalente pour chacune d'entre elle :

$$\begin{cases} \lambda_{sup} = \frac{e_{sup}}{R_{sup}} \\ \lambda_{inf} = \frac{e_{inf}}{R_{inf}} \end{cases}$$

on obtient ainsi :

$$\begin{cases} \lambda_{sup} = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ \lambda_{inf} = 0,008 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{cases}$$

Ces valeurs nous permettent alors de proposer un modèle que l'on peut maintenant qualifier de simplifié de la cellule LGI. De cette manière, le modèle initial à 6 zones peut être confronté à un modèle monozone, dans lequel la toiture complexe intégrant le PMR est décrite sous la forme d'une paroi constituée de 7 couches (*tôle / air / aluminium / polyéthylène / aluminium / air / placoplâtre*), chaque couche étant décrite par un modèle nodal à trois nœuds.

De manière analogue à ce qui précède, nous présentons sur les courbes des figures 9 et 10 la comparaison des températures d'air des zones 1 et 2 pour les modèles détaillé et simplifié. La température d'air mesurée est aussi présentée. Les résidus sont également proposés afin de mieux visualiser les écarts entre les prédictions des modèles et la mesure. Il est à noter toutefois que dans le cas du modèle simplifié la comparaison de la température de lame d'air inférieure est effectuée avec celle du nœud interne de la couche d'air équivalente.

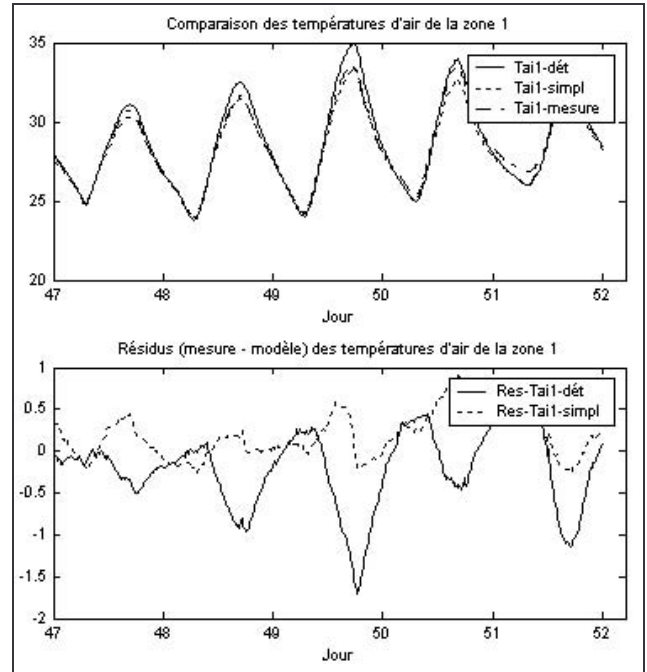


Figure 9: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, simplifié et les mesures dans l'enceinte de la cellule expérimentale

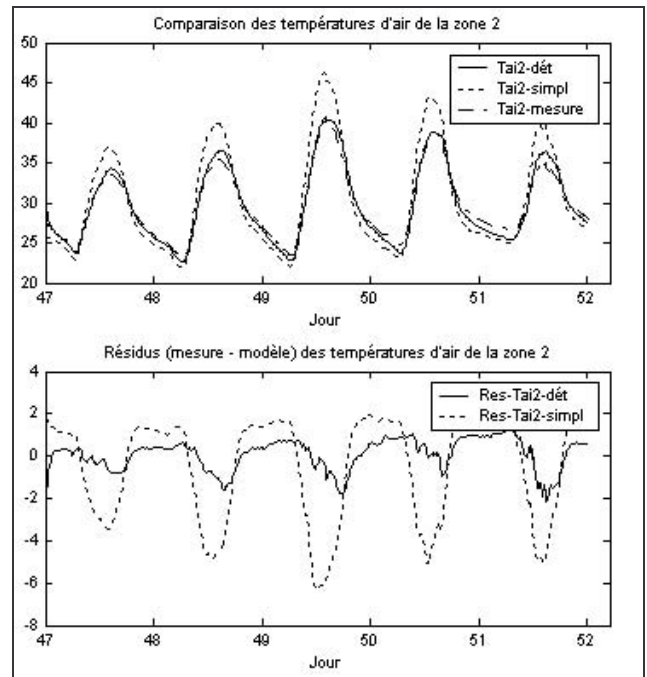


Figure 10: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, simplifié et les mesures dans la lame d'air inférieure du complexe de toiture

Les courbes, en particulier celle donnant le résidu de la température d'air pour le modèle simplifié, confortent notre

simplification dans le cas de l'enceinte de la cellule LGI. L'évolution de la température d'air de l'enceinte reste la encore dans la marge d'erreur acceptable. Par contre, les courbes de la figure 10, qui concernent cette fois-ci la température d'air de la lame d'air inférieure du complexe de toiture, montrent que l'hypothèse d'un transfert purement conductif est mise en défaut. En effet, l'évolution du résidu de la température de la zone 2 dans le cas du modèle simplifié ne respecte pas l'intervalle de validité que nous nous sommes fixé.

Néanmoins, au regard de l'allure des courbes, il semble que la dynamique de l'évolution de la température soit respectée, ce qui laisse entrevoir la possibilité de déterminer des conductivités thermiques équivalentes qui améliorent le comportement du modèle simplifié. Nous nous orientons donc vers une procédure d'optimisation des conductivités thermiques équivalentes des lames d'air supérieure et inférieure, le critère de sélection étant une minimisation du résidu. Ainsi après le lancement d'une procédure d'optimisation basée sur un algorithme du simplex, nous obtenons les résultats suivants :

$$\begin{cases} \lambda_{\text{sup}} = 0,073 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ \lambda_{\text{inf}} = 0,012 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{cases}$$

Une fois ces valeurs intégrées au modèle simplifié, nous pouvons alors confronter à nouveau les courbes.

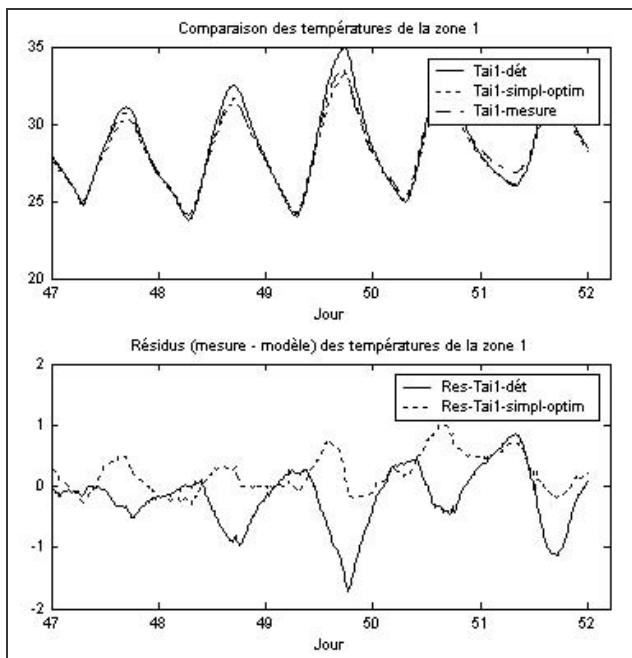


Figure 11: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, simplifié optimisé et les mesures dans l'enceinte de la cellule expérimentale

On constate que l'évolution de la température d'air de l'enceinte de la cellule est sensiblement la même pour le

modèle simplifié optimisé ; l'introduction des conductivités thermiques équivalentes optimisées a donc une influence limitée sur cette grandeur.

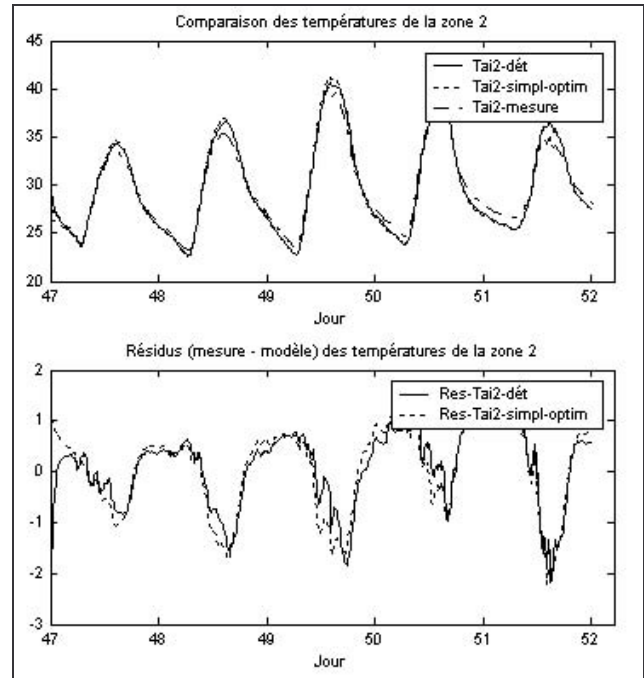


Figure 12: Evolution des températures d'air fournies par les modèles détaillé, simplifié optimisé et les mesures dans la lame d'air inférieure du complexe de toiture

Par contre, la concordance des températures d'air de la lame d'air inférieure est bien meilleure, avec un résidu pour le modèle simplifié optimisé qui s'est très nettement amélioré. Dans le cas des deux températures, les marges d'erreurs acceptables sont respectées, ce qui conforte notre modèle. Bien que l'on ne puisse assimiler directement la paroi complexe avec PMR à une paroi multicouche, ce qui revient à considérer que le transfert thermique à travers elle est purement conductif, il semble qu'il existe un modèle conductif dont le comportement se rapproche de celle de notre paroi.

Afin de corroborer nos résultats, nous avons à nouveau confronté le modèle simplifié optimisé au modèle détaillé et à la mesure sur une autre séquence climatique; les résultats sont analogues à ceux présentés plus haut, les résidus étant inclus dans nos intervalles de validité. Nous sommes donc en mesure de juger notre modèle simplifié optimisé valide dans le cadre que nous nous sommes fixé.

Ce modèle simple nous fournit les moyens de déterminer les caractéristiques thermiques escomptées, en particulier la résistance thermique équivalente de notre paroi complexe ; en effet, l'équivalent conductif multicouche étant satisfaisant, la valeur de la résistance thermique en découle naturellement :

$$R_{th} = \sum_{c=1}^{N_c} R_c$$

où R_c est la résistance thermique d'une couche de matériau et N_c le nombre de couches.

Ce calcul simple, nous mène alors la valeur de la résistance thermique équivalente suivante :

$$R_{th} \approx 3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

On peut alors se livrer au calcul de la conductance équivalente du complexe de toiture :

$$K_{th} = \frac{1}{R_{th}} \approx 0,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Ce résultat peut être rapproché de la valeur présentée lors de la détermination expérimentale de la conductance apparente du complexe de toiture, $K_{app} = 0,28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. On constate que les valeurs sont proches et indiquent que la conductance thermique globale du complexe de toiture est de l'ordre de $0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

CONCLUSIONS

L'étude présentée ici concerne les parois complexe intégrant des produits minces réfléchissants. Ces produits sont utilisés en isolation thermique de parois de bâtiments et compte tenu de certaines particularités liées à leur constitution et à leur mise en œuvre n'entrent pas tous dans le cadre normalisé des produits dits isolants thermiques. En conséquence, les données de références sont rares et souvent sujettes à polémique.

Compte tenu de cette problématique, que nous avons qualifié de réglementaire, une méthodologie a été mise en place afin de permettre la détermination des caractéristiques thermiques, en particulier la résistance thermique d'une paroi complexe standard incluant un PMR.

Basée sur des simulations en régime dynamique, la démarche suivie a pour point de départ l'élaboration d'un modèle détaillé d'une cellule expérimentale en environnement naturel. Par simplifications progressives de ce dernier, un modèle simplifié a pu être obtenu, dont la particularité est la prise en compte de la paroi complexe sous la forme d'une paroi multicouche, les conductivités équivalentes des lames d'air ayant fait l'objet d'une procédure d'optimisation.

Les conclusions de la démarche proposée sont les suivantes :

- *Les transferts thermiques dans le complexe de toiture ne peuvent pas être directement assimilés à un transfert thermique par conduction, ce résultat s'explique simplement par le fait que la présence*

du PMR minimise et non annule les transferts radiatifs ;

- *Sous réserve de valeurs spécifiques des conductivités thermiques des lames d'air, on peut toutefois trouver un équivalent purement conductif permettant de traduire le comportement thermique de la paroi réelle ;*
- *La résistance thermique de la paroi complexe vaut environ $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, ce qui correspond à une bonne performance du complexe de toiture ; la conductance associée vaut quant à elle de l'ordre de $0,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.*

Enfin, dans le cadre du label ECODOM, les valeurs obtenues montrent que le complexe de toiture satisfait aux exigences requises, la conductance maximale à ne pas dépasser pour l'intégration des produits étant $0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

RÉFÉRENCES

- [1]. Garde F., Boyer H., Célaire R., 2000. *Elaboration d'un label de conception thermique des bâtiments dans les départements d'outre-mer français*. Annales du BTP 2 (Avril 2000) : 27-40 ISSN 1270-9840
- [2]. Mara, T., Boyer, H., Garde, F., 2002. *Parametric Sensitivity Analysis of test cell thermal model using spectral analysis*. ASME Journal of Solar Energy Engineering. 124 (2002) 237 - 242
- [3]. Medina M.A., 2000. *On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels*. Energy and Buildings, Volume 33, Issue 1, 1 November 2000, Pages 31-40
- [4]. Miranville F., Boyer H., Mara T., Garde F. *On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions*. Energy and Buildings, Volume 35, Issue 10, November 2003, Pages 997-1008
- [5]. Miranville, F. *Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en Climat Tropical Humide*. Thèse Sci.: Université de La Réunion. 2002
- [6]. Miranville F., Boyer H., Garde F., 2002. *Détermination expérimentale des caractéristiques thermiques d'une toiture incluant un produit mince réfléchissant en climat tropical humide*. Annales du BTP 6 (décembre 2002) : 33-46 ISSN 1270-9840