

Caractérisation expérimentale de propriétés radiatives de revêtements en toiture : Application à un bâtiment industriel

Abdelkrim TRABELSI^{1,2}, Maxime DOYA¹, Emmanuel BOZONNET¹, Patrick SALAGNAC^{1*}, Rafik BELARBI¹, Rémi PERRIN²

¹Laboratoire d'Études des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment, Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau - 17042 La Rochelle Cedex 1

² SOPREMA

14 rue de Saint-Nazaire, 67025 Strasbourg Cedex 01

* patrick.salagnac@univ-lr.fr

Résumé : L'étude présentée dans cet article a pour objectif de caractériser expérimentalement les propriétés radiatives de revêtements d'étanchéité de toiture et leur implémentation dans un code de thermique du bâtiment. La caractérisation des propriétés radiatives est réalisée d'une part en utilisant des méthodes standards et d'autre part en identifiant par méthode inverse les propriétés en réalisant un bilan thermique en surface du revêtement. Suivant la technique utilisée, les résultats obtenus montrent une disparité quant à l'évaluation de la réflectivité solaire.

Nomenclature

E	densité de flux radiatif, $W.m^{-2}$	ε	émissivité, -
h_c	coefficient d'échange thermique par convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	φ	densité de flux, $W.m^{-2}$
t	temps, s	σ	cste de Stéphan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
V	vitesse du vent, $m.s^{-1}$	<i>cond</i>	conduction
<i>Symboles grecs</i>		<i>CLO</i>	courte longueur d'onde
ρ	coefficient de réflexion, -	<i>GLO</i>	grande longueur d'onde
		S	surface
		<i>sol</i>	solaire

1. Introduction

L'utilisation de codes de simulation thermique dynamique dans l'évaluation du comportement des bâtiments se généralise de plus en plus y compris dans le domaine de l'ingénierie. L'implémentation de ces codes nécessite une connaissance accrue des propriétés des matériaux utilisés, notamment les propriétés radiatives en distinguant les courtes et les grandes longueurs d'ondes. Les principales propriétés d'un matériau d'un point de vue des transferts radiatifs sont la réflectivité solaire (CLO) et l'émissivité thermique aux grandes longueurs d'onde (GLO). La modification de ces propriétés impacte directement sur les apports solaires et la température de surface des bâtiments. Du point de vue de la performance énergétique des bâtiments, l'augmentation de ces caractéristiques en été permet de diminuer les besoins en rafraîchissement et améliore le confort. En hiver, la diminution de ces propriétés permet de diminuer les besoins en chauffage [1]. Au niveau urbain, l'augmentation de la réflectivité et/ou de l'émissivité implique des températures de surface de bâtiment plus faibles, ce qui a pour conséquence de diminuer les échanges de chaleur par convection entre les bâtiments et la canopée urbaine. Par ailleurs, l'augmentation de la réflectivité solaire engendre l'augmentation des pertes radiatives globales de la ville [2]. La modification de ces propriétés radiatives permet ainsi d'influer directement sur les performances (consommation, confort thermique) des bâtiments et sur le micro-climat urbain.

Actuellement, en dehors des normes existantes sur la mesure des propriétés radiatives, différentes techniques ont été développées et présentées dans la littérature scientifique. Akbari et al. [3] ont ainsi développé une méthode basée sur la norme E1918. Cette technique permet de réaliser des expériences sur des échantillons de 1 m² contrairement aux 10 m² imposés par la norme. Dans ces travaux de thèse, Doya [4] a développé une méthode in-situ qui permet à la fois de déterminer les propriétés radiatives et le coefficient d'échange thermique par convection. Cette méthode permet de fournir des résultats fiables en prenant en compte la réalité du site (météorologie locale). Dans la suite de ces travaux, l'objectif de cet article est de caractériser expérimentalement les propriétés radiatives de revêtements de toiture et de les implémenter dans un code de thermique du bâtiment afin d'en évaluer l'impact. Différentes techniques de caractérisation ont été utilisées et comparées.

2. Protocole expérimental

2.1. Revêtements caractérisés

La caractérisation entreprise dans cette étude porte sur 5 types de revêtements d'étanchéité fabriqués par l'entreprise SOPREMA (*Figure 1*) : une membrane synthétique FLAGON EP PR blanche en polymère TPO et des membranes bitumineuses recouvertes de différents composants (aluminium gaufré : Sopralast Alu ; paillettes d'ardoise : Sopralene Flam 180 AR ; films de polymères structurés différemment : Soprasolin Star et Soprastar). Ces deux derniers ont été spécialement traités afin d'avoir des réflectivités solaires élevées (matériaux dits « cool »).

2.2. Techniques de caractérisation

L'émissivité (GLO) est mesurée sur des échantillons carrés de 8 cm de côté. La mesure est réalisée à l'aide d'un émissiomètre AE permettant de déterminer l'émissivité hémisphérique. Cet appareil est pourvu d'une résistance électrique dont le but est de chauffer les échantillons et d'un détecteur dont le rôle est de mesurer le flux radiatif. La comparaison du flux obtenu pour l'échantillon par rapport à un matériau de référence dont l'émissivité est connue avec précision permet d'accéder à l'émissivité inconnue.

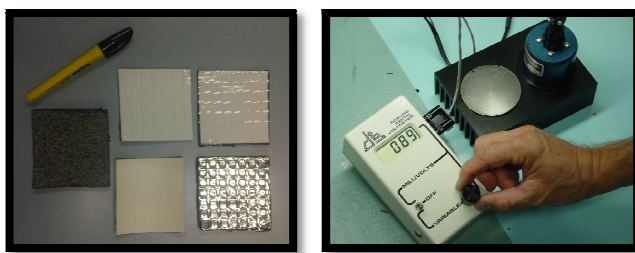


Figure 1 : Revêtements d'étanchéité étudiés et émissiomètre.

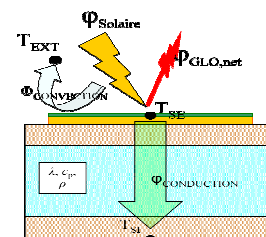


Figure 2 : Schéma du dispositif.

La réflectivité solaire (albédo) est mesurée à l'aide d'une méthode développée au laboratoire [4]. Cette dernière permet non seulement de remonter à l'albédo mais aussi au coefficient d'échange thermique par convection. Le principe consiste à identifier ces paramètres par méthode inverse à partir du bilan thermique surfacique (*Figure 2*) exprimé par l'équation (1). Cette dernière est obtenue en supposant qu'il n'y a pas d'évaporation en surface et que tout le flux radiatif GLO est émis de la surface vers la voûte céleste. L'expression du coefficient d'échange thermique par convection en fonction de la vitesse du vent est déterminée dans une première étape sur la période nocturne. Par la suite, l'albédo est déterminé sur la période diurne. Les autres composantes du bilan thermique sont, quant à

elles, mesurées directement à partir d'un banc expérimental spécialement développé à cet effet : les rayonnements solaires CLO et GLO sont mesurés à l'aide d'un pyranomètre-pyrgéomètre ; la température de surface et le flux conduit à travers la surface sont mesurés respectivement à l'aide de thermocouples et de capteurs de flux sur des échantillons carrés de 25 cm de côté ; la température extérieure et la vitesse du vent sont mesurées à l'aide d'une sonde de température et d'un anémomètre.

$$(1 - \rho_{sol}) \cdot E_{sol} + \epsilon_{GLO}(E_{GLO} - \sigma \cdot T_S^4) + h_c(T_{air} - T_S) = \varphi_{Cond} \quad (1)$$

Le banc expérimental permettant de mesurer l'albédo a été placé sur le toit d'un bâtiment à La Rochelle. Les mesures ont été réalisées sur une période hivernale de 3 mois. En parallèle, deux autres techniques ont été utilisées sur un type de revêtement (Soprarstar) et les résultats obtenus ont été comparés aux résultats de la méthode précédente. La première technique est une méthode standard (ASTM E1918) [5]. Elle requière des échantillons de 10 m² de surface. La seconde technique utilise un spectrophotomètre (ASTM E903 [6]).

3. Résultats et discussion

3.1. Émissivité de grande longueur d'onde

Les valeurs des émissivités GLO mesurées sont résumées dans le *Tableau 1*. Ces valeurs serviront à la détermination du coefficient d'échange thermique par convection et de l'albédo de ces mêmes revêtements. On peut constater que sur l'ensemble des produits étudiés, la valeur de l'émissivité est importante excepté pour le revêtement en aluminium gaufré. Les deux revêtements traités spécialement ont une émissivité légèrement inférieure aux matériaux classiques.

	Flagon EP / PR	Soprasolin Star	Soprarstar	Sopralast Alu	Sopralène Flam 180 AR
Émissivité	0,86 ± 0,02	0,69 ± 0,01	0,63 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,84 ± 0,04

Tableau 1 : Émissivités GLO des revêtements d'étanchéité étudiés.

3.2. Réflectivité de courte longueur d'onde

Une technique inverse est utilisée afin d'identifier les paramètres (réflectivité et coefficient d'échange convectif). Le principe est basé sur la minimisation entre les relevés expérimentaux et simulés. Afin de réaliser cette opération, un traitement important des données expérimentales est nécessaire. Il consiste à éliminer les jours de pluie et les périodes de condensation. Afin d'obtenir des résultats significatifs, une durée d'acquisition importante est nécessaire.

Le coefficient d'échange thermique par convection h_c est déterminé en période nocturne. Ainsi, le flux solaire est nul et l'équation (1) ne comporte plus qu'une seule inconnue qui n'est autre que h_c . Comme l'incertitude diminue avec l'augmentation de l'écart de température entre la surface de l'échantillon et l'air ambiant ([4]-[7]), les données correspondantes à un écart de température inférieure à 2°C ont été éliminées. De plus, la rugosité des surfaces étant différente, on détermine un coefficient d'échange convectif par matériau. Un modèle linéaire [8] a été adopté pour décrire le coefficient d'échange convectif en fonction de la vitesse. Ce choix est motivé par le fait que les vitesses de vent mises en jeu sont, pour la plupart du temps, inférieures à 5 m/s. La fonction objective à minimiser s'exprime à partir de la différence quadratique entre les coefficients d'échange convectif numériques (définis comme une fonction linéaire de la vitesse du vent) et expérimentaux (définis à partir de l'équation de bilan (1) en période nocturne :

$$F_{obj} = \sum_t \left([aV + b] - \left[\frac{\varphi_{Cond} - \epsilon_{GLO}(E_{GLO} - \sigma \cdot T_S^4)}{(T_{air} - T_S)} \right] \right)^2 \quad (2)$$

où a et b sont des constantes dépendantes de la texture de la surface et de la vitesse du vent.

Paramètres / Revêtements	Flagon EP / PR	Soprasolin Star	Soprarstar	Sopralène Flam 180 AR
a	6,2	6,7	6,0	6,9
b	9,0	10,0	10,0	5,9

Tableau 2 : Paramètres associés au modèle linéaire du coefficient d'échange convectif.

Le Tableau 2 présente les paramètres obtenus associés au coefficient d'échange thermique par convection pour les différents revêtements étudiés. Le Sopralast Alu a été exclu du tableau car les périodes de condensation pour ce matériau en période nocturne sont très fréquentes. Hormis pour le Sopralène Flam, il y a peu d'écart entre les valeurs de h_c . La rugosité de ces matériaux n'a qu'un faible impact sur les résultats, par contre, les écarts de température impactent sensiblement le coefficient de corrélation sur le coefficient d'échange thermique par convection. Des mesures en période estivale permettront d'affiner ces résultats, notamment en fonction de la dépendance à l'écart de température.

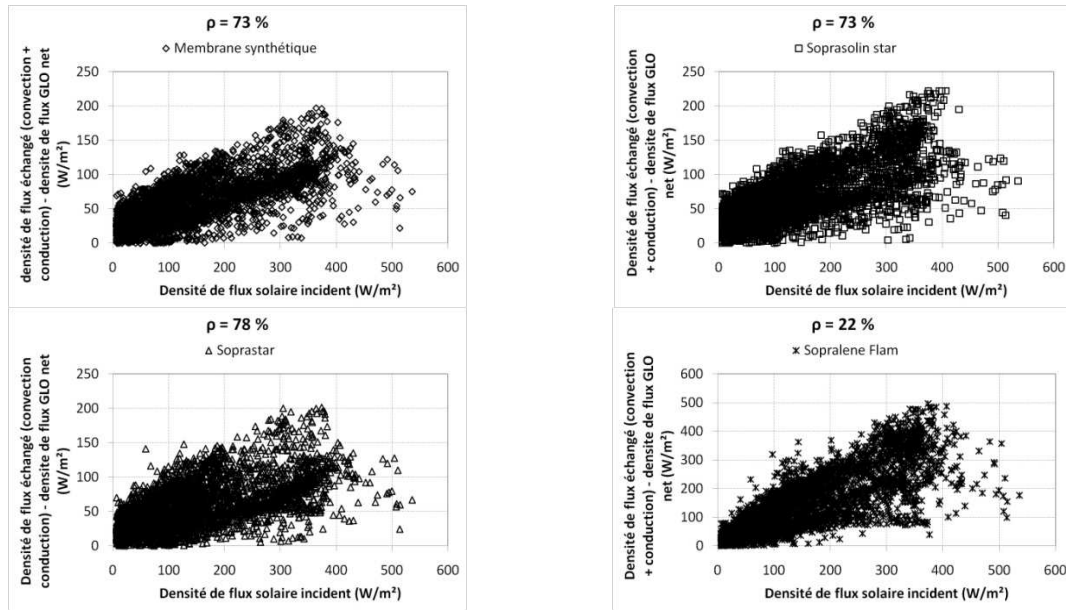


Figure 3 : Réflectivités des revêtements d'étanchéité étudiés.

Pour déterminer l'albédo des matériaux, la minimisation est réalisée avec des relevés diurnes. La fonction objective s'exprime alors :

$$F_{obj} = \sum_t \left([(1 - \rho) \cdot E_{sol}(t)] - [\epsilon_{GLO}(\sigma \cdot T_S^4(t) - E_{GLO}(t)) - (a \cdot V(t) + b)(T_{air}(t) - T_S(t)) + \varphi_{Cond}(t)] \right)^2 \quad (3)$$

La Figure 3 présente les réflectivités solaires évaluées. Les nuages de points représentent les mesures de la densité de flux échangé par convection/conduction moins la densité de flux radiatif GLO net en fonction de la densité de flux radiatif solaire. La pente de la droite centrée

sur les nuages de points donne l'absorptivité solaire. Le coefficient de détermination pour ces minimisations varie entre 0,4 et 0,7. La précision de cette technique dépend du coefficient d'échange convectif et des conditions météorologiques.

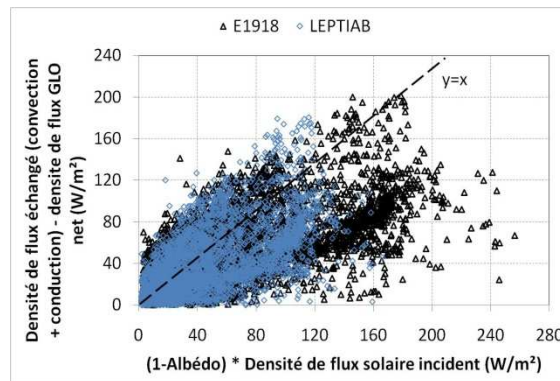


Figure 4 : Comparaison de la précision de fermeture entre les deux techniques étudiées.

D'après la Figure 3, on peut constater que les revêtements dits « cool » présentent des albédos importants (autour de 75%) alors qu'elle n'est que de 25% pour un revêtement standard (Sopralène Flam). Pour le Soprastar, des mesures supplémentaires suivant les normes ASTM E903 et E1918 ont été réalisées. L'albédo est égal à 78% en utilisant la méthode développée au laboratoire et respectivement de 74,4% et 52% suivant les normes ASTM E903 et E1918. Ainsi, on peut conclure que la méthode développée au LEPTIAB présente de meilleurs résultats que la méthode E1918 pour une évaluation en période hivernale. En effet, si on compare les 2 techniques (Figure 4), on obtient des résultats plus dispersés pour la méthode ASTM E1918 : l'écart type moyen pour la méthode développée est de 19,5 W/m² alors qu'il est de 24,1 W/m² pour la méthode ASTM E1918.

Les figures 5 et 6 montrent respectivement l'évolution des températures de surface sur une journée ainsi que leur distribution sur la période d'acquisition. On peut noter l'intérêt d'utiliser des revêtements « cool » qui présentent des températures de surface plus faibles.

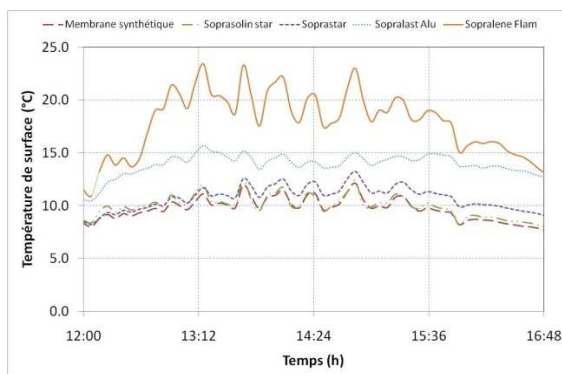


Figure 5 : Évolution de la température de surface sur une période diurne.

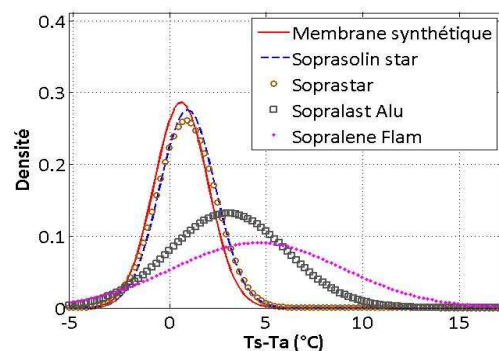


Figure 6 : Distribution des écarts de température entre la surface et l'air ambiant en période diurne.

3.3. Impact des propriétés radiatives

En guise d'application, afin d'évaluer l'impact de l'albédo, nous avons réalisé des simulations thermiques dynamiques sur un bâtiment commercial [9] en considérant deux matériaux : le « Soprasolin Star » et le « Sopralène Flam ». Les simulations montrent que l'utilisation de tel ou tel matériau ne modifie pas significativement le comportement

thermique du bâtiment : augmentation de la consommation annuelle en chauffage (environ 3%) et diminution de la température opérative maximum en période d'été de 0,6°C pour un climat Poitevin dans le cas d'un bâtiment fortement isolé. En revanche, nous pouvons présager un impact significatif dans le cas de bâtiment faiblement isolé (cas du bassin méditerranéen) et sur l'îlot de chaleur urbain [10].

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons évalué expérimentalement les propriétés radiatives de revêtements d'étanchéité de toiture et montré leur impact sur la thermique d'un bâtiment. Pour ce faire, un banc expérimental a été développé et permet de mesurer en fonction du temps les échanges radiatifs (CLO et GLO), les flux échangés par conduction, la vitesse du vent et les températures de surface et d'air. Ce banc expérimental a permis de mettre en évidence les aspects suivants :

- des écarts de température de 5,3°C en moyenne pour un albédo de 22% alors qu'il est de 1,8°C pour un albédo de 78%.
- La technique développée au laboratoire permet d'obtenir pour l'albédo de meilleurs résultats que la méthode E1918, spécialement en période hivernale. Par ailleurs, elle permet d'intégrer les variations journalières des paramètres, notamment l'impact de la météorologie locale (spectre solaire réel) contrairement à la méthode ASTM 903 qui utilise un spectre solaire normalisé.

Par la suite nous envisageons d'étudier la période estivale et, d'évaluer l'impact du vieillissement (dégradation et pollution) et de la pente des toitures sur les propriétés radiatives de revêtement à travers l'analyse de leur évolution dans le temps. Par ailleurs, l'humidité de la surface ou la présence d'un film d'eau ont un impact sur la réflectivité solaire. Une étude complémentaire permettra d'évaluer l'influence de ces paramètres.

Remerciements

Les auteurs remercient la région Alsace pour son concours financier.

Références

- [1] A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari, "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions," *Energy and Buildings*, vol. 39, Nov. 2007, pp. 1167-1174.
- [2] S. Bretz, H. Akbari, A. Rosenfeld, "Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands," *Atmospheric Environment*, vol. 32, 1998, pp. 95-101.
- [3] H. Akbari, R. Levinson, S. Stern, "Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies," *Solar Energy*, vol. 82, 2008, pp. 648-655.
- [4] M. Doya, "Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense," Université de La Rochelle, 2010.
- [5] ASTM, "ASTM E1918 - 97 Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field (Withdrawn 2006)," *ASTM International*, 1997.
- [6] R.D. Clear, L. Gartland, F.C. Winkelmann, "An empirical correlation for the outside convective air-film coefficient for horizontal roofs," *Energy and Buildings*, vol. 35, Sep. 2003, pp. 797-811.
- [7] J.A. Palyvos, "A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems... modeling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, Juin, pp. 801-808.
- [8] A. Trabelsi, E. Bozonnet, P. Salagnac, R. Belarbi, R. Perrin, "Étude de l'impact des ouvrants en toiture sur les performances énergétiques de bâtiments industriels," IBPSA France, Moret-sur-Loing: 2010, 8 pages.
- [9] H. Akbari, S. Konopacki, M. Pomerantz, "Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States," *Energy*, vol. 24, 1999, pp. 391-407.