

Quantification des effets de l'érosion sur un verre sodo-calcique par émissivité apparente

Samy BRAZANE*, Olivier RIOU, Fabien DELALEUX, Laurent IBOS, Jean-Félix DURASTANTI

Centre d'études et de recherche en thermique, environnement et systèmes (CERTES), IUT Sénart Fontainebleau,

Université Paris Est Créteil - 77567 Lieusaint France

*auteur correspondant : samy.brazane@u-pec.fr

Résumé - L'érosion éolienne compromet le maintien des performances énergétiques des systèmes à énergie solaire. Dans ce travail, nous démontrons la capacité métrologique des caméras thermiques LWIR-VOx à quantifier la gravité de l'érosion dans des conditions de laboratoire. L'indicateur émissivité apparente se révèle sensible aux dégradations de surfaces induites et la corrélation entre l'émissivité apparente et la transmittance du verre dans le visible est établie. Ces résultats ouvrent la possibilité d'une cartographie 2D en émissivité apparente exploitant les capacités d'imagerie infrarouge afin de localiser les zones érodées et d'en quantifier la gravité.

Nomenclature

$\varepsilon_{\Delta\lambda}(t)$	Émissivité apparente	$t^{\circ app}$	Température apparente, radiative, °C
$\varepsilon(\lambda, T)$	Émissivité spectrale directionnelle	$t^{\circ emis}$	Température d'émission, °C
$L^0(\lambda, T)$	Luminance de corps noir, W m ⁻³ sr ⁻¹	$L_{\Delta\lambda}(t)$	Thermosignal (OS)
$R(\lambda)$	Réponse spectrale de la caméra	$L_{\Delta\lambda}^0(t)$	Thermosignal équivalent corps noir (OS)
λ	Longueur d'onde, μm	τ	Transmittance (%)
$\Delta\lambda$	Largeur de la bande spectrale de mesure, μm	ϕ	Densité de flux (W/m ²)
$[\lambda_1; \lambda_2]$	Limites de la bande spectrale de mesure, μm	e	Émissivité logicielle
$t^{\circ env}$	Température d'environnement, radiative, °C	d	Distance de prise de vue logicielle

1. Introduction

En exploitation, les systèmes à énergie solaire sont soumis à des conditions climatiques variables entraînant une dégradation de leurs performances énergétiques dans le temps. Du fait de son faible coût et de ses propriétés optiques adaptées, le verre sodo-calcique est intensivement utilisé dans ces systèmes (panneaux photovoltaïques, chauffe-eau solaires, miroirs à concentrateur, etc...). Le verre étant exposé aux agressions climatiques, il s'opacifie naturellement dans le temps. Il en résulte principalement une diminution de sa transmission dans le visible. Parmi tous les processus d'altérations, l'érosion est la plus sévère, car elle est irréversible et particulièrement intense là où la ressource solaire est abondante (milieux arides ou désertiques associés à des vents forts) [1].

À l'heure actuelle, les moyens de contrôle sur site sont essentiellement de proximité (tests électriques et contrôles visuels). À l'échelle d'une installation étendue, ces contrôles prennent beaucoup de temps et ne permettent pas une détection précoce des altérations. Dans ce contexte, le CERTES élabore un dispositif de contrôle non destructif par émissivité apparente. Cet indicateur est obtenu en exploitant les capacités métrologiques des caméras thermiques.

Dans cet article, nous montrons que l'émissivité apparente fournie par la caméra bolométrique A325sc présente une forte sensibilité au pourcentage de surface érodée. La corrélation de l'émissivité apparente avec la transmittance dans le domaine du visible est établie, permettant d'évaluer la gravité de l'érosion en terme de performances énergétiques des systèmes.

2. Émissivité apparente

L'émissivité apparente est quantifiable par une méthode thermique (*single-heating method* - *SHM*) [2] :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(t) = \frac{L_{\Delta\lambda}(t^{\circ}_{app}) - L_{\Delta\lambda}^0(t^{\circ}_{env})}{L_{\Delta\lambda}^0(t^{\circ}_{emis}) - L_{\Delta\lambda}^0(t^{\circ}_{env})} \quad (1)$$

La connaissance de trois températures est nécessaire : la température apparente qui est évaluée par la caméra thermique ($e = 1, d = 0$) ; la température d'environnement quantifiée dans les mêmes conditions par un réflecteur infrarouge [3] et la température d'émission qui est obtenue par deux thermomètres de contact. Nous avons fait le choix d'utiliser des thermocouples en raison de leur faible encombrement et de leur temps de réponse très court. Les thermocouples utilisés sont de type K. Une cale ajourée en carton est employée pour isoler thermiquement l'échantillon de la plaque de maintien (figure 1). Ils sont insérés sous la cale, en contact direct avec l'échantillon. La plaque de maintien applique une pression de contact. Les brins thermocouples se thermalisent sur environ 20 mm et les jonctions débouchent sur les lèvres de la cale. La température au centre de l'échantillon (température d'émission) est déduite des températures de lèvres suivant la procédure détaillée dans la référence [5]. Les thermosignaux associés sont ensuite calculés via la courbe d'étalonnage de la caméra [4]. Le dispositif est présenté sur la figure 1 et détaillé dans la référence [5].

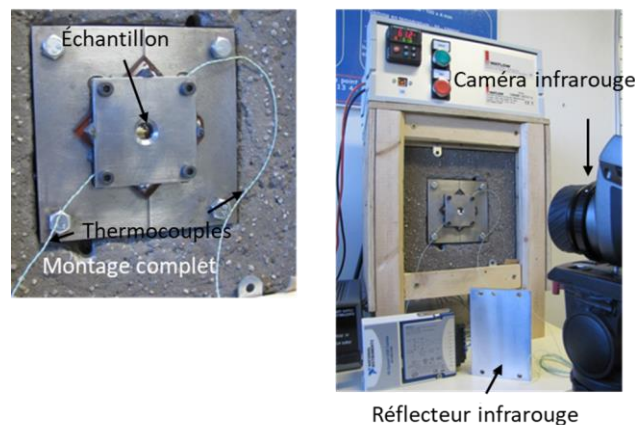


Figure 1. Dispositif expérimental, développé par le CERTES

Le dispositif permet le mesurage de l'émissivité apparente d'un échantillon plan d'environ $4 \times 4 \text{ cm}^2$ au travers d'une ouverture de diamètre 10 mm. Le dispositif fonctionne à des températures pouvant atteindre les 500°C et présente une résolution de 2 % et une exactitude de 0,5% en émissivité apparente [5]. La méthode *SHM* est fondamentalement intrusive dans la mesure où nous devons connaître la température d'émission de la cible.

3. Raccordement de l'émissivité apparente et de l'émissivité spectrale

Dans le but de vérifier l'exactitude des températures mesurées par la caméra, nous procédons maintenant au raccordement de l'émissivité apparente à l'émissivité spectrale de la cible. Chrzanowski [6] propose une formulation permettant leur raccordement :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(t) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Nous testons le raccordement entre l'émissivité apparente et l'émissivité spectrale d'un échantillon de verre sodo-calcique non érodé. L'émissivité spectrale a été préalablement caractérisée au CERTES sur la gamme [2µm – 25µm] à 25°C, en utilisant un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (PerkinElmer FTIR Spectrometer Frontier). La réponse spectrale de la caméra A325sc nous a été fournie par l'assembleur (matrice oxyde de vanadium, optique standard) [7]. Les limites métrologiques de bande spectrale sont [8,1 µm – 13,0 µm] sur la gamme de température [-20°C – 120°C]. Elles sont issues de la méthode [4] appliquée aux thermosignaux d'étalonnage de la caméra. Le résultat est montré sur la figure 2 :

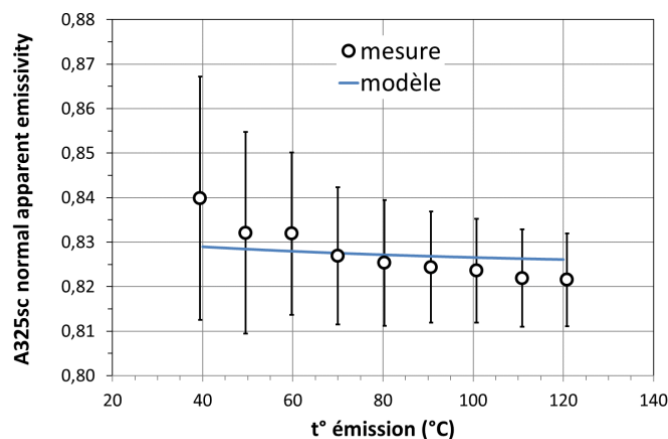


Figure 2. Comparaison des valeurs d'émissivités apparentes d'un verre sodo-calcique issues de la méthode SHM (eq.1, marques rondes) et de la caractérisation spectrale (eq. 2, trait plein bleu). Les barres d'erreur de la méthode SHM sont indiquées [5].

Nous constatons un bon accord validant de ce fait, l'exactitude de la caméra, ses limites métrologiques de bande spectrale et l'équation radiométrique courte distance mise en œuvre dans la quantification de l'émissivité apparente (équation 1).

4. Préparation des échantillons de verre

Nous avons préparé huit échantillons de verre sodo-calcique à différents degrés d'érosion. Cette dernière est produite au moyen d'une sableuse d'atelier dont nous contrôlons la pression de sablage, l'angle d'incidence et le temps de sablage (figure 3).



Figure 3. Sablage des échantillons de verre sodo-calcique

Une observation visuelle permet de délimiter la zone où l'érosion nous semble uniforme. La zone à étudier est ensuite spécifiée par un cercle (figure 3 à droite). Ces échantillons sont enfin classés par érosion croissante.

5. Taux d'érosion

Le taux d'érosion est quantifié par une méthode d'imagerie basée sur le contraste noir et blanc. La méthode consiste à prendre des clichés des verres sous un microscope avec un agrandissement de 50 (figure 4).

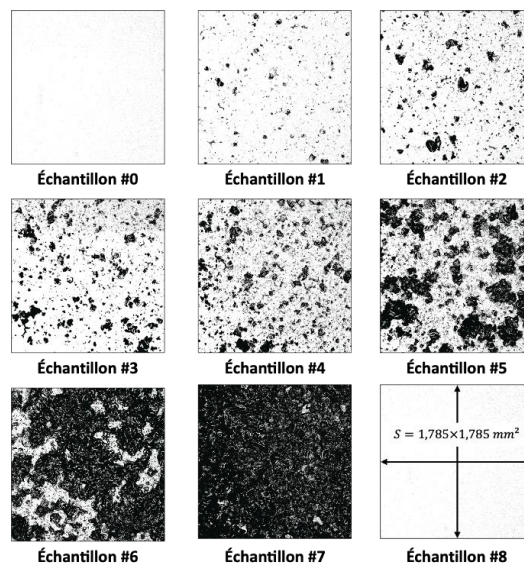


Figure 4. Photographie des échantillons après une amélioration de contraste. Les échantillons 0 et 8 sont non-érodés.

En utilisant un logiciel de traitement d'image, nous déterminons le pourcentage de surface claire associé à la surface totale non-érodée. Le complément à 100% quantifie la surface totale érodée (tableau 1) :

	% surface non érodée	% surface érodée
Echantillon 0	99.98	0.02
Echantillon 1	91.85	8.15
Echantillon 2	80.92	19.08
Echantillon 3	71.32	28.68
Echantillon 4	51.85	48.15
Echantillon 5	30.66	69.34
Echantillon 6	8.14	91.86
Echantillon 7	0.09	99.91
Echantillon 8	99.98	0.02

Tableau 1. Taux d'érosion

Les échantillons #0 et #8 ont fait l'objet d'une caractérisation séparée : elle conduit au même résultat. Le taux d'érosion est correctement discrétisé. À noter que nous ne tenons pas compte de la morphologie des impacts ni de leurs tailles caractéristiques qui peuvent s'écarter des conditions naturelles.

6. Erosion et transmittance du verre

L'érosion modifie la transmittance du verre dans le domaine du visible. Pour quantifier son effet, nous avons assemblé un dispositif comportant une lampe solaire et un pyranomètre encagé. Sa bande spectrale d'absorption est [300 nm – 2800 nm], couvrant le proche UV, l'intégralité du spectre visible et le proche infrarouge. Le dispositif est présenté sur la figure 5 :

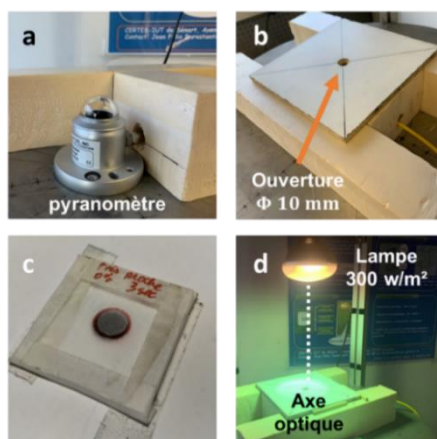


Figure 5. Dispositif pour la quantification de la transmittance du verre

Le taux de transmission se détermine en trois temps : **1.** nous mesurons le flux parasite Φ_0 , en utilisant une plaque occultante de la même taille que le porte-échantillon (fig. 5b) **2.** Le flux incident Φ_i est mesuré à travers l'ouverture de 10 mm de diamètre du porte-échantillon vide (fig. 5b) **3.** Le flux transmis Φ_t est enfin mesuré à travers l'échantillon en prenant soin d'aligner la zone d'analyse délimitée par le cercle sur l'ouverture du porte-échantillon (fig. 5c). La transmittance est calculée conformément à l'équation 3 :

$$\tau = \frac{\Phi_i - \Phi_0}{\Phi_t - \Phi_0} \quad (3)$$

Les résultats obtenus pour chaque échantillon sont représentés sur la figure 6 :

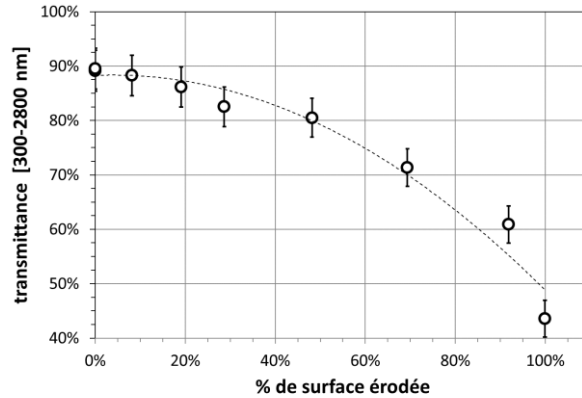


Figure 6. Transmittance [300 nm – 2800 nm] en fonction du % de surface érodée. Les barres d'erreur sont calculées tenant compte d'une erreur de 5 W/m² du pyranomètre

L'impact de l'érosion sur la transmittance est considérable. Il ne semble pas y avoir d'effet de seuil. En situation, l'érosion éolienne provoque une diminution régulière et irréversible de la puissance solaire captée dans des rapports atteignant 50%.

7. Erosion et émissivité apparente

Les échantillons sont maintenant caractérisés en émissivité apparente par la méthode thermique (eq. 1). Compte tenu de la forte dérive thermique de la caméra, nous avons été contraints de climatiser l'expérimentation afin de maintenir la température de caméra constante à 29.8 ± 0.2 °C. L'écart d'émissivité apparente est présenté sur la figure 7 :

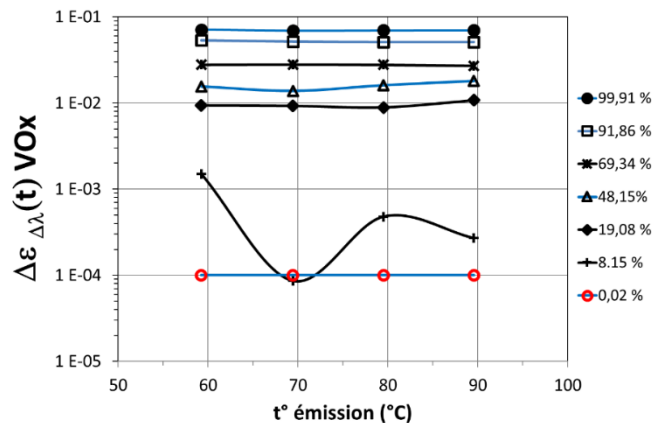


Figure 7. Écart d'émissivité apparente en fonction des températures d'émission pour différents taux d'érosion (échelle logarithmique)

On observe une grande sensibilité de l'émissivité apparente avec le pourcentage d'érosion. Compte tenu de la résolution de mesure (2 ‰), l'érosion est détectable dès 20% de surface érodée (à partir de l'échantillon 2) quelles que soient les températures d'émission comprises entre 60°C et 90°C. Sur la figure 8, nous représentons les variations de l'émissivité apparente moyenne avec le pourcentage de surface érodée :

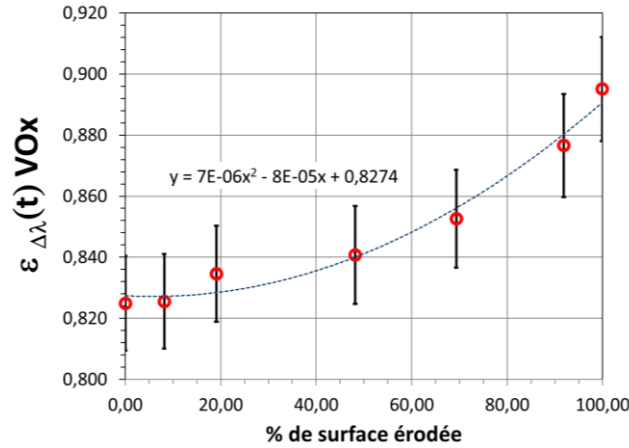


Figure 8. Émissivité apparente moyenne en fonction de la surface érodée

La caractéristique est non linéaire. Dans une approximation polynomiale d'ordre 2, la valeur à l'origine nous indique l'émissivité apparente moyenne du verre non érodé ($\approx 0,83$, voir figure 2). Le coefficient de sensibilité $1/\varepsilon_{\Delta\lambda} \times d\varepsilon_{\Delta\lambda}/dx$ (x est identifié au taux de surface érodée en pourcent) varie de $6,5 \cdot 10^{-5} \%^{-1}$ (19 % de surface érodée) et $7 \cdot 10^{-4} \%^{-1}$ (99,9% de surface érodée). L'émissivité apparente se positionne dans la catégorie des mesurandes intéressants pour détecter ce type de défauts. Sur la figure 9, nous présentons la relation de corrélation entre la transmittance [300 nm – 2800 nm] et la variation d'émissivité apparente évaluée pour une température d'émission de 60°C :

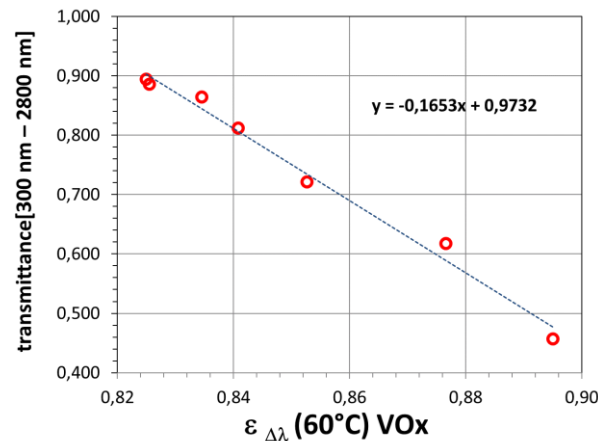


Figure 9. transmittance [300 nm – 2800 nm] versus émissivité apparente @60°C

L'émissivité apparente est raccordée à la transmittance du verre dans le visible : l'indicateur permet une évaluation de la gravité de l'érosion.

8. Conclusions

Nous avons étudié la détectabilité des effets de l'érosion sur un verre sodocalcique par l'indicateur émissivité normale apparente LWIR-Vox. Ce mesurande se révèle très sensible à l'érosion (coefficient de sensibilité 0,7 à $7 \cdot 10^{-4} \%^{-1}$). Le seuil de détectivité est observé à 20% de surface érodée en conditions de laboratoire (contrôle stricte des températures d'influence). La corrélation entre l'émissivité apparente et la transmittance [300 nm – 2800 nm] du verre est établie, permettant la quantification de la gravité de l'érosion sur les performances énergétiques des systèmes à énergie solaire.

Cet indicateur est fourni dans une approche de thermographie quantitative. À la condition de s'affranchir de la température d'émission et en s'appuyant sur les capacités d'imagerie des caméras, nous disposerions d'un outil non-intrusif et non-destructif pour produire un indicateur graphique 2D (émissogramme) imageant l'émissivité apparente en coordonnées spatiales (x, y) des points de la surface [8]. L'émissogramme permettra de localiser les zones érodées (affectation d'une couleur en fonction de la valeur de l'émissivité apparente) et d'en quantifier la gravité (corrélation de l'émissivité apparente avec une propriété fonctionnelle du système, la transmittance visible dans le cas des systèmes à énergie solaire). Cet indicateur offrira au maintenancier un outil de choix quant au maintien ou au remplacement des éléments constitutifs du système.

Références

- [1] AGEA-BLANCO B., M. C. (2018). Sand erosion of solar glass: Specific energy uptake, total transmittance, and module efficiency. *International Journal of Energy Research*, 42, 1298–1307.
- [2] WALACH, T. (2008). Emissivity measurements on electronic microcircuits. *Measurement*, 41(5), 503-515
- [3] ASTM E1862–97(2002)-e1. Standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers. 2002.
- [4] O Riou, PO Logerais, F Delaleux, JF Durastanti (2014). A self-method for resolving the problem of apparent LWIR emissivity for quantitative thermography up to 130 C. *Infrared Physics & Technology* 67, 504-513
- [5] Olivier RIOU, Vincent GUIHENEUF, Fabien DELALEUX, Pierre-Olivier LOGERAIS, Jean-Félix DURASTANTI (2016). Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials. *Measurement*, 89, 239-251.
- [6] CHRZANOWSKI, K. (1995). Problem of determination of effective emissivity of some materials in MIR range. *Infrared physics & technology*, 36(3), 679-684
- [7] BALCON, P. (2021). Communication personnelle. FLIR corporation.
- [8] Olivier RIOU, Fabien DELALEUX, Pierre-Olivier LOGERAIS, Jean-Félix DURASTANTI (2019). Outil de quantification sans contact du vieillissement par émissivité apparente en conditions extérieures, *SFT Nantes Juin 2019*.