

Outil de contrôle non destructif pour la quantification du vieillissement des concentrateurs solaires

Fabien DELALEUX*, Olivier RIOU, Vincent GUIHENEUF, Pierre-Olivier LOGERAIS, Jean-Félix DURASTANTI

CERTES, Université Paris-Est Créteil, IUT Sénart-Fontainebleau, 36 rue Georges Charpak, 77567 LIEUSAIN

* (auteur correspondant : fabien.delaleux@u-pec.fr)

Résumé - Dans cet article, nous présentons une méthode de quantification du vieillissement de miroirs verre des héliostats par leur émissivité apparente. La méthode est raccordée aux propriétés spectrales du verre. Elle présente l'avantage d'être sans contact et permet de distinguer des altérations équivalentes à 3 ans de durée de vie standard. Cet outil permet de cartographier la surface étudiée en émissivité apparente puis de convertir ces valeurs en variation de propriétés optiques dans le visible (absorbance, réflectance ou transmittance) suivant la fonction attendue.

Nomenclature

t température d'émission, °C
 L thermosignal, OS
LWIR long wavelength IR
MWIR mid wavelength IR
SMIR small wavelength IR

Symboles grecs
 $\varepsilon(\lambda)$ émissivité spectrale
 $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ émissivité apparente
Indices et exposants
 app apparent
 env environnement

1. Introduction

L'objectif de ce travail est de concevoir un outil de contrôle non destructif et non intrusif pour l'évaluation du vieillissement des systèmes solaires à concentration. Celui-ci impose la définition préalable des indicateurs associés puis la constitution de moyens de mesurage permettant leur quantification in situ. Cette approche permet de décider du maintien ou du remplacement des systèmes selon des critères technico-économiques. La diminution du rendement de concentration au cours du temps est étroitement liée au vieillissement des matériaux constitutifs du concentrateur solaire (verre, couches minces etc..). Ce dernier est généralement évalué en laboratoire en appliquant des protocoles de vieillissement accéléré normalisés simulant des périodes d'exploitation de l'ordre de 20 à 30 ans. Cette approche ne permet pas une évaluation du vieillissement en exploitation par des moyens non destructifs puisque nécessitant un échantillonnage. Le vieillissement naturel des matériaux entraînent des altérations notamment en surface, modifiant ainsi leur émissivité spectrale. Etant donné que l'émissivité apparente est reliée à l'émissivité spectrale, cet indicateur doit être capable de détecter les altérations de surface. La quantification de l'émissivité apparente met en œuvre une caméra thermique commerciale. D'un usage simple et rapide, cet outil permet de cartographier la surface étudiée en émissivité apparente puis de convertir ces valeurs en

variation de propriétés optiques dans le visible (absorbance, réflectance ou transmittance) suivant la fonction attendue.

2. Emissivité apparente et émissivité spectrale

L'émissivité apparente intervient dans l'équation radiométrique qu'utilisent implicitement tous les imageurs thermiques : ce paramètre $\varepsilon_{\Delta\lambda}(t)$ mesure le thermosignal d'émission de l'objet rapporté à celui d'un corps noir à la même température. Nous rappelons l'expression de l'équation radiométrique, mise en œuvre dans les systèmes infrarouges :

$$L_{\Delta\lambda}(t_{app.}) = \varepsilon_{\Delta\lambda}(t) L_{\Delta\lambda}^0(t) + (1 - \varepsilon_{\Delta\lambda}(t)) L_{\Delta\lambda}^0(t_{env.}) \quad (1)$$

$L_{\Delta\lambda}^0(t)$ et $L_{\Delta\lambda}^0(t_{env.})$ sont respectivement les thermosignaux de corps noirs associés aux températures d'émission t et d'environnement $t_{env.}$. Le thermosignal fourni par la caméra $L_{\Delta\lambda}(t_{app.})$ est associé à la température apparente $T_{app.}$. Ces thermosignaux sont rapportés à la bande spectrale de détection $\Delta\lambda$ de la caméra. Une fois la validité du modèle de l'émetteur admise, l'expression de l'émissivité apparente devient :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(t) = \frac{L_{\Delta\lambda}(t_{app.}) - L_{\Delta\lambda}^0(t_{env.})}{L_{\Delta\lambda}^0(t) - L_{\Delta\lambda}^0(t_{env.})} \quad (2)$$

Son mesurage est alors possible à partir des trois températures (apparente, d'environnement, émission) et de la courbe d'étalonnage de la caméra IR. La caractérisation des systèmes est détaillée dans la référence [1]. Cet indicateur est spécifique à la technique de détection mise en œuvre dans la caméra, de la bande spectrale de détection et de l'émissivité spectrale de la cible.

L'émissivité apparente est liée aux propriétés spectrales de l'émetteur. Chrzanowski [2] propose une formulation générique permettant de raccorder les deux émissivités :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

$\varepsilon(\lambda, T)$ désigne l'émissivité spectrale de la cible, $L^0(\lambda, T)$ est la luminance du corps noir et $R(\lambda)$ est la réponse spectrale normalisée du système. Le produit de ces quantités est enfin intégré sur la bande spectrale $[\lambda_1 - \lambda_2]$ du système.

Une quantification indirecte de l'émissivité apparente est donc possible moyennant la connaissance de chaque terme de la relation (3). La connexion de l'émissivité apparente et de l'émissivité spectrale obtenue par réflectométrie IR a été vérifiée expérimentalement pour différents matériaux (acier, verre, polycarbonates) dans la référence [3]. De nombreux mécanismes de vieillissement naturel induisent une modification de l'émissivité spectrale suite à des mécanismes de corrosion, de recristallisation ou d'altération chimique. Les effets du vieillissement naturel peuvent être quantifiés par émissivité apparente si les dégradations produisent des variations d'émissivité spectrale dans la bande spectrale du système infrarouge utilisé. Pour illustrer les capacités de détection de telles variations, nous traitons un corps gris (émissivité spectrale de 0,5) présentant des variations d'émissivité spectrale supposées résulter de modifications structurelles de la surface produites pendant la durée de vie du système. Une forme gaussienne est utilisée pour reproduire de telles variations. Elle est infiniment différentiable et elle permet de simuler le passage d'une variation de type bande

étroite à une anomalie de type large bande en faisant varier son écart-type σ . La largeur de l'anomalie est définie par $\delta\lambda \approx 6 \times \sigma$ tandis que son amplitude est quantifiée par $\delta\varepsilon$ (figures 1a, b et c). Le produit $\delta\lambda \times \delta\varepsilon$ définit la surface typique de l'anomalie qui diffère de la surface gaussienne dans un rapport $2\pi^{1/2}$. L'émissivité apparente est calculée en utilisant la relation (3), dans laquelle la réponse spectrale $R(\lambda)$ est connue sur la bande normalisée LWIR [$8\ \mu\text{m} - 13\ \mu\text{m}$]. Le résultat est montré sur la figure 1 pour des températures d'émetteur comprises entre -20°C et 180°C . Les effets sont significatifs si nous sommes capables de quantifier des variations d'émissivité apparente de l'ordre du pourcent.

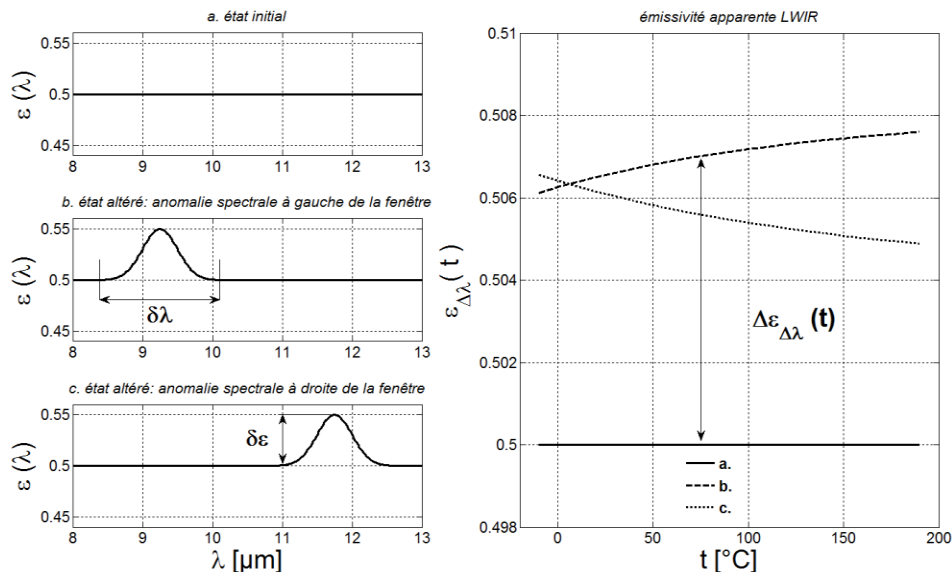


Figure 1 : Connexion de l'émissivité apparente avec l'émissivité spectrale des surfaces

3. Caractérisation spectrale des miroirs verre

La caractérisation spectrale est effectuée pour trois échantillons de verre d'épaisseur de 6 mm provenant des héliostats du grand four solaire de 1 MW Odeillo. Les échantillons sont respectivement nommés Odeillo #1, #2 et #3. Ces miroirs sont en service depuis un certain nombre d'années ; environ cinq ans pour Odeillo #1, 10 ans pour Odeillo # 2 et 20 ans pour Odeillo # 3. Les essais sont effectués en caractérisant les miroirs verre dans leur état initial et après avoir subi le protocole standard de vieillissement accéléré ($85^\circ\text{C}/85\%$ d'humidité relative) pendant 1000 heures. Ce test normalisé et utilisé pour la certification des modules photovoltaïques est équivalent à 20 ans de vieillissement standard. La méthode utilisée pour la mesure de l'émissivité spectrale est une méthode indirecte de type réflectométrique [4]

L'émissivité spectrale hémisphérique des échantillons initiaux est présentée sur la figure 2. L'émissivité spectrale peut discriminer l'âge initial des échantillons (Odeillo # 3), mais la même distinction pour des âges plus proches (Odeillo # 1 et Odeillo 2 #) est plus délicate.

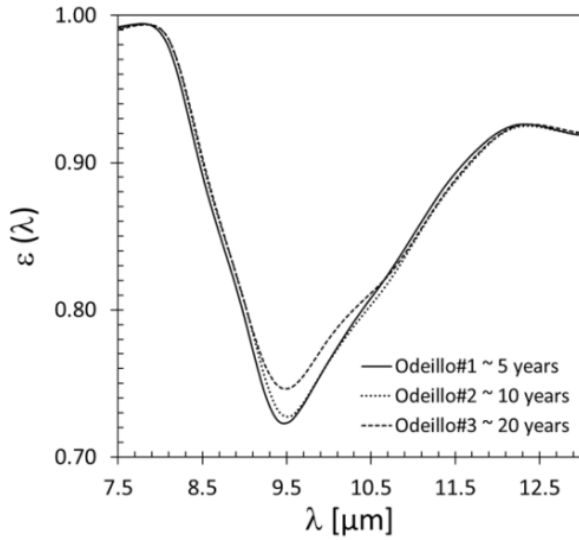


Figure 2 : Emissivité spectrale hémisphérique initiale des miroirs verre Odeillo

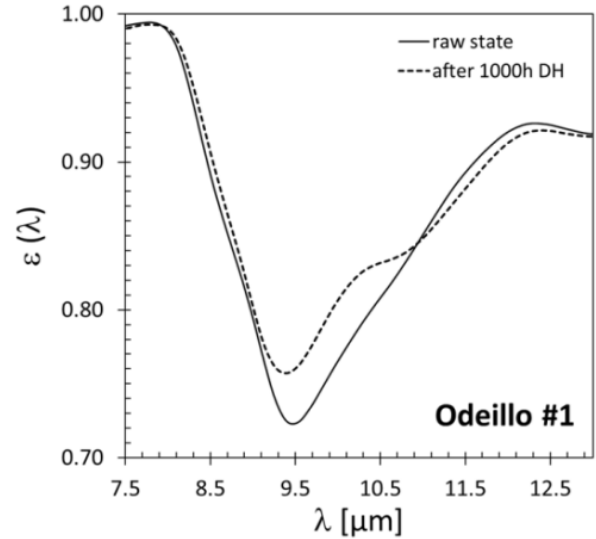


Figure 3 : Emissivité spectrale hémisphérique d'Odeillo #1 à l'état initial et après 1000h de vieillissement en chaleur humide

L'écart d'émissivité spectrale dans la fenêtre [9.2μm - 11μm] reproduit un vieillissement naturel caractéristique des miroirs. Rapporté à Odeillo #1, l'écart d'émissivité spectrale d'Odeillo #3 est d'environ 3,1 μm%.

Ensuite, les trois échantillons ont été placés en enceinte climatique et exposés au test de chaleur humide décrit précédemment. La figure 3 présente l'émissivité spectrale de Odeillo #1 à l'état brut et après 1000 heures en chambre climatique. Les effets du vieillissement accéléré sont similaires à ceux du vieillissement naturel observés chez Odeillo #3 à l'état initial. La figure 4 détaille les écarts en émissivité spectrale des trois verres Odeillo avant et après vieillissement accéléré dans la fenêtre [3μm – 20μm].

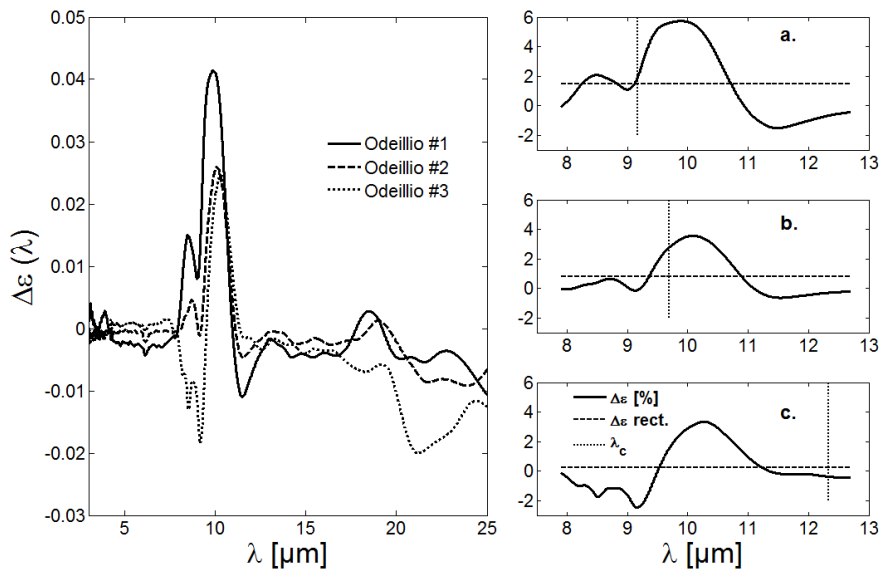


Figure 4 : Ecart d'émissivité spectrale hémisphérique des miroirs verre Odeillo. a. Odeillo #1; b. Odeillo #2 et c. Odeillo #3. En trait plein: écart [%]; ligne horizontale pointillée: valeur moyenne % calculée sur la bande spectrale [7,9 – 12,7 μm] de la caméra ThermaCAM E300; ligne pointillée verticale: barycentre λ_c de l'anomalie.

Les effets du vieillissement accéléré sont exclusivement observés dans la bande LWIR. Cela confère à ces systèmes IR la capacité de les quantifier, à l'exclusion des autres bandes spectrales normalisées SWIR et MWIR. Le vieillissement accéléré suit globalement le processus de vieillissement naturel: **a.** une augmentation de l'absorption dans la bande [9.5 μm – 10.5 μm] : prononcée chez Odeillo #1, elle est du même ordre chez Odeillo #2 et #3 ; **b.** une diminution de l'absorption dans la bande [8 μm – 9 μm] ; **c.** une augmentation de l'absorption dans la bande [11 μm – 13 μm]. Les effets b et c. progressent en complémentarité et déportent le barycentre de l'anomalie vers les grandes longueurs d'onde.

Le barycentre de l'anomalie est calculé par:

$$\delta\varepsilon_{\text{rect}} \times \Delta\lambda \times \lambda_c = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \times \delta\varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

La position de λ_c par rapport au milieu de la fenêtre de détection ($\lambda_m = 10,3\mu\text{m}$) détermine la dépendance en température de l'émissivité apparente [4]: **a.** aussi longtemps que $\lambda_c < \lambda_m$, l'émissivité apparente croît avec la température; **b.** il est stable avec la température pour $\lambda_c = \lambda_m$ et **c.** elle diminue avec la température lorsque $\lambda_c > \lambda_m$. Comme le barycentre de l'anomalie change au cours du processus de vieillissement accéléré, la dépendance en température de l'émissivité apparente peut varier d'un échantillon à l'autre.

4. Caractérisation des miroirs en émissivité apparente

Nous utilisons une caméra ThermoCAM E300 pour quantifier l'émissivité apparente des miroirs. Elle met en œuvre une matrice VOx comportant 320 \times 240 détecteurs. Sa bande spectrale est [7,9 – 12,7 μm] [1]. L'incertitude de mesure de température apparente est de 0,1 $^\circ\text{C}$.

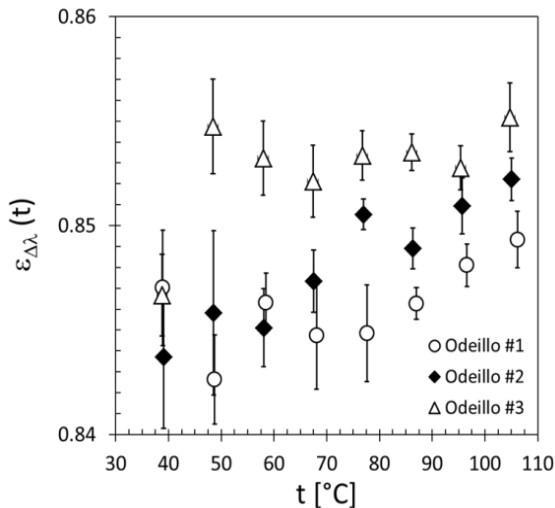


Figure 5 : *Emissivité apparente LWIR des miroirs Odeillo dans leur état initial.*

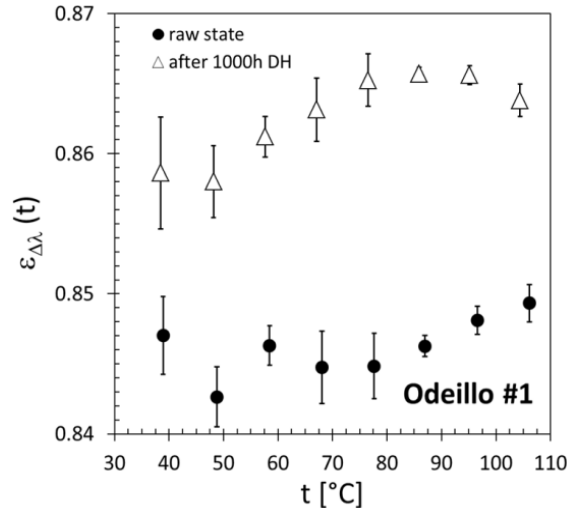


Figure 6 : *Emissivité apparente d'Odeillo #1 avant et après 1000h de vieillissement accéléré*

La caractérisation de l'émissivité apparente est effectuée dans la plage [20 $^\circ\text{C}$ – 120 $^\circ\text{C}$] au moyen d'un banc de caractérisation détaillé dans la référence [3]. La figure 5 montre l'émissivité apparente des trois échantillons de verre dans leur état initial. A partir d'une température d'émetteur supérieure à 70 $^\circ\text{C}$, la discrimination fondée sur l'âge des échantillons est envisageable. Les valeurs d'émissivité apparentes augmentent de façon monotone avec l'état de vieillissement initial des miroirs. Odeillo #3 est clairement discriminé: l'écart

d'émissivité apparente (avant/après vieillissement accéléré) est de 0,8%. Sur la figure 6, l'émissivité apparente normale LWIR de Odeillo. #1 est présentée avant et après l'essai de chaleur humide. Les barres d'erreur indiquent la répétabilité de mesure ($\pm 0,002$). La figure 7 présente l'écart relatif % pour chaque échantillon de verre.

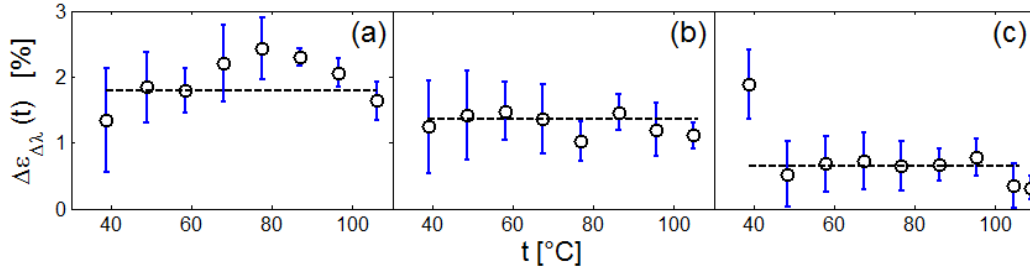


Figure 7 : Ecart relatif % en émissivité apparente LWIR des miroirs verre Odeillo: a. Odeillo #1; b. Odeillo #2 et c. Odeillo #3

L'écart d'émissivité apparente rend compte du vieillissement accéléré. Les trois miroirs présentent des valeurs quasi-constantes pour des températures d'émission comprise entre 40°C et 110°C, ce qui signifie que la dépendance en température de l'émissivité apparente est conservée pendant le processus de vieillissement accéléré. D'autre part, le processus de vieillissement accéléré est de nature différente selon l'âge initial des miroirs. Il est d'autant plus prononcé que le miroir est initialement jeune.

5. Discussion

L'émissivité apparente LWIR est un indicateur pertinent pour quantifier le vieillissement des miroirs verre des héliostats. Les limitations de l'approche résident dans ses capacités de mesurage ainsi que la connaissance des températures d'émission et d'environnement. Les performances typiques de mesures obtenues en situation intérieure sont détaillées dans le tableau 1.

Température	répétabilité	incertitude combinée
ambiante	0.2°C	0.2°C
environnement	0.2°C	0.2°C
émission	0.1°C	0.3°C
$\delta\epsilon_{\Delta\lambda}(\delta t)$	0.2%	0.5%
apparente	0.1°C	0.3°C
$\delta\epsilon_{\Delta\lambda}(\delta t)$	0.2%	0.5%
$\delta\epsilon_{\Delta\lambda}$	0.3 %	0,7%

Tableau 1 : Incertitude de type A et B des mesures de températures pour la quantification de l'émissivité apparente LWIR en situation intérieure.

La résolution globale $\delta\epsilon_{\Delta\lambda}$ de mesure de l'émissivité apparente est la somme quadratique des résolutions associées à chaque incertitude de température. La répétabilité dépend à la fois de la qualité de la correction de non uniformité (typiquement 0,1°C à 35°C) et de la répétabilité de la température d'émission. L'incertitude combinée dépend de la qualité de la

compensation de la dérive thermique. Sans précaution particulière, l'incertitude de la compensation chez la caméra ThermoCAM E300 est typiquement de $0,3^{\circ}\text{C}$.

Est-il possible d'obtenir les mêmes performances en conditions extérieures? Dans une approche non-intrusive, nous ne pouvons pas envisager une régulation de la température d'émission. Sa valeur est imposée par les conditions ambiantes. Les trois paramètres clés pour atteindre des performances similaires sont **a.** le contraste $t_{app} - t_{env}$; **b.** l'incertitude de mesure de la température apparente δt_{app} et **c.** l'uniformité de la température d'émission δt . L'utilisation en extérieur d'un système infrarouge standard avec $\delta t_{app} = 0,1^{\circ}\text{C}$ et une non-uniformité $\delta t = 0,5^{\circ}\text{C}$ de la température d'émission (20°C) permettrait d'atteindre une résolution de 1,7% en exposant la cible à un environnement type ciel clair (t_{env} comprise entre -30 et -20°C). La recherche de meilleures conditions de contrôle ($\delta t = 0,25^{\circ}\text{C}$) améliorerait la résolution (0,9%). On aurait également avantage à thermographier des miroirs « chaud » i.e. $t = 40^{\circ}\text{C}$ ce qui permettrait d'atteindre une résolution de 0,6% soit 6 ans d'exposition standard. Une étude poussée des performances théoriques de la méthode a été réalisée [3].

6. Conclusion et perspectives

L'émissivité apparente LWIR est un indicateur pertinent pour quantifier le vieillissement du verre. Il présente des variations de l'ordre de 1,8% au cours du vieillissement accéléré. En comparant l'écart d'émissivité apparente avec l'incertitude combinée de mesure, une approche de laboratoire est capable de discriminer sans contact un vieillissement absolu avec une résolution de 8 années standard d'exploitation. Cette approche peut également distinguer des modifications équivalentes à 3 ans standards sur le même échantillon.

L'approche peut être utilisée en situation extérieure. L'utilisation d'un système infrarouge standard ($\delta t_{app} = 0,1^{\circ}\text{C}$) associée à non-uniformité $\delta t = 0,25^{\circ}\text{C}$ de la température d'émission (20°C), permettrait d'atteindre une résolution de 0,9% (10 ans d'exploitation standard) en exposant la cible à un environnement type ciel clair (t_{env} comprise entre -30 et -20°C).

La mesure d'émissivité apparente est sans contact et bénéficie des techniques d'imagerie développées pour la thermographie infrarouge. La cartographie de l'émissivité apparente est possible par l'élaboration d'un code de post-traitement spécifique traitant les thermosignaux. Enfin, il est inutile de développer un système IR spécifique dans la mesure où la caméra commerciale répond aux exigences de répétabilité (qualité de correction de non-uniformité) et d'incertitude de combinée (qualité de la compensation de dérive thermique).

Un point important est la compréhension du vieillissement accéléré. Il implique des modifications chimiques dues à l'hydratation forcée du verre. Les effets sur la réflectivité des miroirs sont faibles. Ils sont significatifs sur de grandes périodes de temps généralement supérieures à 20 ans d'exploitation. D'autres processus de vieillissement peuvent être quantifiés : c'est le cas de l'érosion. L'érosion produit une fissuration et un écaillage de la surface, rendant les surfaces poreuses au voisinage de l'impact des aérosols solides. Les dommages vus sur le verre après un test de sandstorm [5] sont similaires à ceux observés sur la céramique d'alumine de porosité croissante [6]. La porosité est connue pour modifier les propriétés émissives de la matière, en particulier dans la bande LWIR [6]. Par exemple, l'émissivité spectrale d'une céramique d'alumine de porosité croissante montre des variations $\delta \varepsilon_{\text{refl.}} \times \delta \lambda$ de l'ordre de 80 $\mu\text{m}\%$ dans la bande LWIR et devrait produire une variation d'émissivité apparente de l'ordre de 18%. Si un seuil de détection de 1% est considéré, elle permettrait de quantifier les effets précurseurs dus à l'érosion équivalent à 5% de la surface du réflecteur en verre correspondant à 3 années d'érosion naturelle dans les sites océaniques / désert au Maroc [7].

Références

- [1] Riou O., Logerais P.O., Delaleux F., Durastanti J.F. (2014). A self-method for resolving the problem of apparent LWIR emissivity for quantitative thermography up to 130°C. *Infrared Physics & Technology*, 67, pp. 504-513.
- [2] Chrzanowski K. (1995). Problem of determination of effective emissivity of some materials in MIR range. *Infrared physics & technology*, 36(3), 679-684.
- [3] Riou, O., Guiheneuf, V., Delaleux, F., Logerais, P. O., & Durastanti, J. F. (2016). Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials. *Measurement*, 89, 239-251.
- [4] Ibos L., Marchetti M., Boudenne A., Dactu S., Livet J., Cadau Y (2006). Infrared emissivity measurement device : principle and applications, *Meas Sc Tech* 2950.
- [5] Kolli, M., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., & Fantozzi, G. (2009). HF etching effect on sandblasted soda-lime glass properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(13), 2697-2704.
- [6] Rozenbaum O., De Sousa Meneses D., Echegut P. (2009). Texture and Porosity Effects on the Thermal Radiative Behavior of Alumina Ceramics, *Int J Thermophys* 30 (2009) 580-590.
- [7] Richard R. Corwin and Adrianus Rodenburgh , Temperature error in radiation thermometry caused by emissivity and reflectance measurement error, *Applied Optics* Vol. 33, Issue 10 (1994), pp. 1950-1957