

Caractérisation du vieillissement par émissivité apparente des miroirs verre des héliostats

Fabien DELALEUX^{1*}, Olivier RIOU¹, Harold ESPARGILLIERE², Pierre-Olivier LOGERAIS¹, Régis OLIVES², Xavier PY², Jean-Félix DURASTANTI¹

¹Laboratoire CERTES – Université Paris Est Créteil – IUT Sénart-Fontainebleau
36 rue Georges Charpak – 77567 Lieusaint Cedex

²Laboratoire PROMES CNRS – Université Perpignan Via Domitia
Rambla de la thermodynamique, Tecnosud – 66100 Perpignan

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

Résumé – Dans ce travail nous démontrons la pertinence de l'indicateur émissivité apparente dans la quantification du vieillissement des matériaux. Le mesurage de l'émissivité apparente utilise des caméras infrarouges commerciales dans des conditions standard d'utilisation. Il ouvre des perspectives nouvelles, notamment comme méthode originale de contrôle non destructif et non intrusif. Au cours d'une étude précédente, le lien entre l'émissivité spectrale d'un matériau et l'émissivité apparente a été mis en évidence. L'émissivité apparente apparaît dans l'équation radiométrique qu'utilisent implicitement tous les imageurs thermiques : ce paramètre mesure le thermosignal d'émission de la cible rapporté à un corps noir à la même température. Chrzanowski a établi la relation suivante :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L^0(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

où $\varepsilon(\lambda, T)$ est l'émissivité spectrale de la cible, $R(\lambda)$ est la réponse spectrale du système infrarouge et $L^0(\lambda, T)$ est la luminance de corps noir. L'ensemble est intégré sur la bande spectrale de détection du système. Partant du principe que toute dégradation des matériaux, pour peu qu'elle ait une signature surfacique, entraîne des modifications sensibles de son émissivité spectrale. Les premiers résultats démontrent la grande sensibilité de l'émissivité apparente aux protocoles de vieillissement accélérés (UV, chaleur humide) appliqués sur les miroirs verre équipant les héliostats du four solaire d'Odeillo. Nous sommes donc en mesure grâce à cet indicateur d'en quantifier leur vieillissement.

La suite de ce travail nous emmènera à réaliser diverses caractérisations physiques afin de comprendre de manière fine les mécanismes en œuvre dans leur vieillissement puis de les corréler aux propriétés fonctionnelles des miroirs.

Remerciements : Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet ANR DryRSP.

Nomenclature

L	Thermosignal, OS (« objet signal »)	λ	longueur d'onde, m
R	réponse spectrale relative		
T	température, °C		
		<i>Indices et exposants</i>	
		app	apparente
		env	environnement
		$\Delta\lambda$	spectral
<i>Symboles grecs</i>			
ε	émissivité		

1. Introduction

L'ensemble des recherches menées sur les systèmes à énergies renouvelables s'est essentiellement attaché à démontrer l'efficacité énergétique de tels systèmes alternatifs dans le but d'intéresser des investisseurs potentiels. La course au rendement s'avère être de plus en plus coûteuse, d'autant plus que celui-ci est physiquement limité, et la notion de vieillissement est souvent oubliée. En allant dans ce sens, le laboratoire CERTES travaille sur la thématique du vieillissement des systèmes solaires, et a déjà montré l'intérêt de la prise en compte de ce phénomène puisque, par exemple, un capteur photovoltaïque, soumis à diverses agressions environnementales (soleil, UV, chaleur, humidité, pollution etc...) perd entre 10 et 15% de son rendement après 20 ans d'exploitation [1,2].

De tels vieillissements ont déjà été observés mais leur quantification reste encore aujourd'hui difficile [3]. Une difficulté dans la quantification du vieillissement réside dans la définition des indicateurs associés et dans leurs moyens de mesurage. Au cours d'une étude précédente, nous avons démontré le raccordement de l'émissivité apparente de matériaux usuels à leur émissivité spectrale obtenue par réflectométrie IR [4]. L'émissivité apparente s'obtient ici de façon non-intrusive et non-destructive à l'aide d'une caméra thermique.

Toute altération des matériaux se manifeste par des modifications sensibles de surface (recristallisation, fissuration, etc...) ou de volume (altération chimique) qui modifient l'émissivité spectrale. L'émissivité apparente étant dépendante de l'émissivité spectrale, cet indicateur est en mesure de quantifier le vieillissement.

Dans cet article, nous définirons ce qu'est l'émissivité apparente et sa méthode de mesure puis nous montrerons à travers quelques échantillons la sensibilité de cet indicateur aux tests de vieillissement accéléré standard (notamment chaleur humide) s'appliquant aux miroirs verre (sodocalcique) des héliostats du grand four solaire d'Odeillo du laboratoire PROMES-CNRS. Nous concluons sur les potentialités de cet indicateur comme technique de contrôle non destructif et non intrusif du vieillissement des matériaux.

2. Notion d'émissivité apparente

L'émissivité apparente apparaît dans l'équation radiométrique qu'utilisent implicitement tous les imageurs thermiques : ce paramètre mesure le thermosignal d'émission de la cible rapporté à un corps noir à la même température. Dans la suite, on le désignera par $\varepsilon_{\Delta\lambda}(T)$.

Nous rappelons l'expression de l'équation radiométrique, mise en œuvre dans les caméras thermiques:

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

où $L_{\Delta\lambda}^0(T)$ et $L_{\Delta\lambda}^0(T_{env.})$ sont les thermosignaux de corps noirs associés respectivement 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 (eq. 1), l'expression de l'émissivité apparente est:

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

Son mesurage est alors possible à partir des trois températures (apparente, d'environnement et d'émission) et de la courbe d'étalonnage du système [4,5]. Cet indicateur est spécifique à la technique de détection mise en œuvre dans la caméra, de la bande spectrale de détection $\Delta\lambda$ et de l'émissivité spectrale de la cible. Une modélisation de l'émissivité apparente a été proposée par Chrzanowski en 1996 [6] :

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

où $\varepsilon(\lambda, T)$ est l'émissivité spectrale de la cible, $R(\lambda)$ est la réponse spectrale du système infrarouge et $L^0(\lambda, T)$ est la luminance de corps noir. L'ensemble est intégré sur $\Delta\lambda$, faisant ainsi sa spécificité (deux systèmes IR de technologies différentes ne donneront pas la même valeur d'émissivité apparente). Pour illustrer la sensibilité de l'indicateur émissivité apparente aux altérations affectant l'émissivité spectrale de la cible, prenons le cas d'un matériau initialement gris (émissivité spectrale 0.5) auquel se superposeraient deux bandes d'absorption respectivement à gauche et à droite de la fenêtre de détection. Les bandes d'absorption représentent ici des modifications structurales de surface issues d'altérations chimiques, de fissures, de recristallisation, etc... le résultat est présenté sur la figure 1 pour la bande [8–13 μ m] :

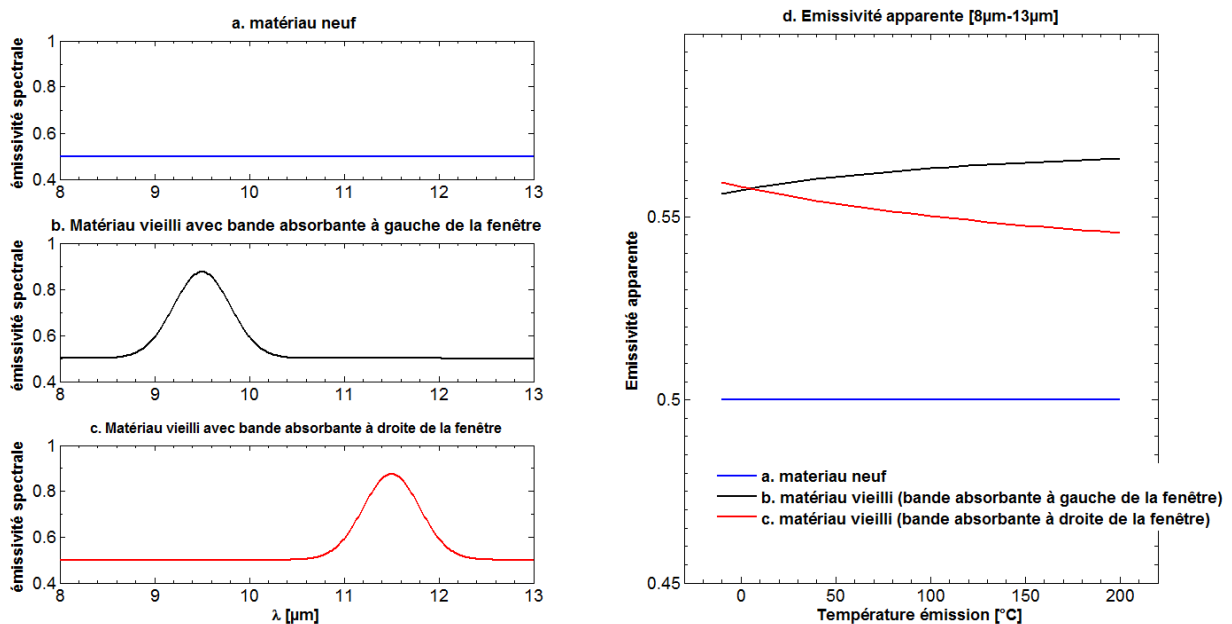


Figure 1 : Sensibilité de l'émissivité apparente à l'émissivité spectrale

Toute modification de l'émissivité spectrale se traduit par une variation sensible de l'émissivité apparente. D'autre part, la position des pics d'absorption par rapport au centre de la fenêtre de détection de la caméra conduit à une dépendance en température différente [4].

3. Moyens expérimentaux

3.1. Moyens de vieillissement accéléré

Des équipements permettant de réaliser des tests de vieillissement accéléré sont disponibles au laboratoire. Une enceinte climatique *Binder* régulée en température (-40 à 180°C) et en humidité (0 à 99%) permet de réaliser le test accéléré dit de « chaleur humide ». Cet essai est normalisé et utilisé pour la certification des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. Un essai dure 1000 heures à 85°C et 85% d'humidité, équivalent à une exposition aux conditions climatiques extérieures de Miami pendant 20 ans [7].

Un autre moyen de vieillissement accéléré utilisé est une enceinte UV (ultra-violet), équipée d'une source UV de 500W sur la plage [180 – 450 nm]. En effet, le spectre solaire est composé de 5% de rayonnement ultra-violet, qui représente la partie la plus énergétique et donc la plus agressive. Ainsi, notre source de 500W est équivalente à une concentration d'environ 130 soleils permettant de réaliser des tests de vieillissement accélérés.

Seuls les résultats de vieillissement en enceinte climatique sont présentés dans cet article.

3.2. Banc de caractérisation de l'émissivité apparente

Le mesurage de l'émissivité apparente suppose la connaissance de la température de l'émetteur. Celle-ci est contrôlée sur trois niveaux (figure 2) : **1)** une référence isotherme est fournie par un bloc en acier de 150×150×50 mm³ scellé dans un ciment réfractaire de 150 mm d'épaisseur. Un régulateur PID nous permet de fixer la température du bloc dans la gamme [20°C - 120°C] avec une non-uniformité de 0,5% de la consigne ; **2)** une pastille de graphite naturel expansé (50x50x6 mm³) est placée en face arrière de l'échantillon. Sa diffusivité thermique élevée (1,4 cm²/s) assure ainsi une thermalisation efficace de l'échantillon. Le montage comprime le GNE en améliorant le contact thermique de l'échantillon sur le bloc isotherme ; **3)** le troisième étage est fourni par une entretoise en papier de 2 mm d'épaisseur. L'entretoise comporte une ouverture circulaire de 8 mm de diamètre en son centre. Elle couvre la face avant de l'échantillon et isole thermiquement l'échantillon de la plaque de montage en face avant. Deux thermocouples sont collés sur l'entretoise et placés en contact direct avec la face avant de l'échantillon : ils nous permettent de mesurer la température de lèvre qui nous permettra ensuite de quantifier la température d'émission au centre de l'ouverture. L'empilement est finalement serré à l'aide d'une plaque ajourée en acier de 1,5 mm d'épaisseur.

Les températures radiométriques sont évaluées au moyen d'une caméra thermique commerciale (Thermacam E300) utilisée dans la gamme [-20 °C – 120 °C]. La bande spectrale de détection a été quantifiée à [7,9µm–12,7µm] [5]. La distance cible-caméra est fixée à 30 cm (distance minimale de mise au point de la caméra). Les températures radiométriques sont réalisées en mode point, minimisant l'effet de taille de la source [8]. Les températures apparente et réfléchie sont obtenues en réglant l'«émissivité» à 1. La température réfléchie est évaluée au moyen d'une plaque d'aluminium polie optiquement conformément à la norme ASTM [9]. Pour éviter les non-uniformités de la température réfléchie induites par la caméra, cette dernière est inclinée de 15° par rapport à la direction normale du dispositif. A partir de ces valeurs de température, nous pouvons calculer la luminance apparente de l'échantillon, la luminance provenant de l'environnement, et enfin

celle du corps noir à la température de l'échantillon. L'émissivité apparente est alors calculée par la relation (2).

L'exactitude de mesure de l'émissivité apparente est affectée par différentes sources d'erreurs : **1)** mesurage des températures de contact, **2)** Evaluation de la température de l'émetteur à partir de la température de lèvres, **3)** Mesurage des températures radiométriques, **4)** Evaluation de la température réfléchie au point de visée à partir de celle mesurée à l'entrée de la cavité. Une étude complète de toutes ces sources d'erreurs a été réalisée [10]. Le dispositif permet une exactitude variant dans l'intervalle [0,5% - 4,2%] pour des matériaux d'émissivité variant entre 0.94 (polycarbonate) et 0.18 (acier inoxydable). La reproductibilité des mesures varie dans l'intervalle [0,5% - 16%], tandis que la répétabilité est comprise entre 0,2% et 10% [10].

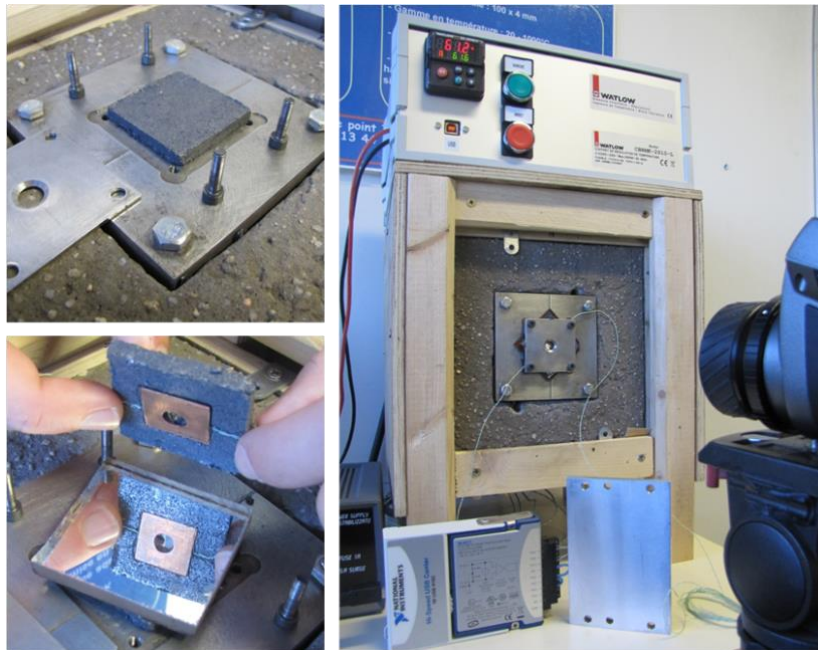


Figure 2 : Banc de caractérisation de l'émissivité apparente

4. Résultats expérimentaux

La caractérisation de l'émissivité apparente de trois échantillons de miroirs verre (notés Odeillo 1, Odeillo 2 et Odeillo 3) a été réalisée. Ces miroirs ont été en exploitation sur les héliostats du grand four solaire d'Odeillo de puissance 1MW pendant des durées inconnues. Nous savons simplement que l'échantillon 1 est âgé de 5 ans, l'échantillon 2 de 10 ans et l'échantillon 3 de 20 ans. Le plan d'expérience est le suivant :

- Caractérisation de l'émissivité apparente des 3 verres à l'état initial
- Caractérisation des 3 verres après application du test de vieillissement accéléré suivant le protocole de la chaleur humide (85°C/85% d'humidité pendant 1000h ; équivalent à 20 ans)

4.1. Emissivité apparente des 3 miroirs à l'état initial

La caractérisation de l'état initial des 3 échantillons a été réalisée afin de servir de référence et de tenter de discriminer ces échantillons en fonction de leur âge. Les résultats sont représentés sur la figure 3 :

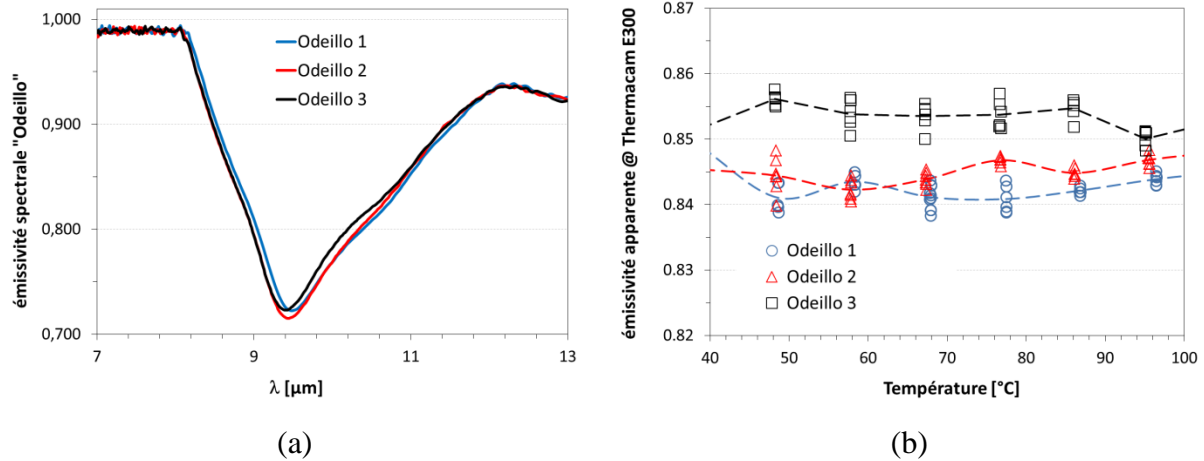


Figure 3 : (a) Emissivité spectrale hémisphérique des 3 échantillons de miroirs à l'état initial (b) Emissivité apparente en fonction de la température sur la plage 40 – 100°C (en pointillé : valeur moyenne des mesures)

La figure 3 montre les tendances de l'émissivité apparente des 3 échantillons : on constate une élévation significative de l'indicateur avec l'âge des miroirs même si les durées réelles d'exploitation ne sont pas connues. La discrimination entre 5 et 10 ans est sujette à caution : la dispersion des mesures est du même ordre que sa reproductibilité (0.005) [10], mais est nette pour l'échantillon 3. L'émissivité apparente semble donc bien être sensible aux dégradations naturelles des verres alors que les émissivités spectrales caractérisées en réflectométrie IR ne montrent pas de différence significative sur la plage 8 – 13 μm (Figure 3a). Ces mesures serviront de base à toutes nos interprétations et analyses.

Chez les verres neufs, nous constatons un accord entre l'émissivité apparente et l'émissivité spectrale dans la limite de la reproductibilité [10]. Le vieillissement naturel des verres n'induit pas de variation notable de leur spectre (Figure 3) tandis que les écarts d'émissivité apparente sont supérieurs à la reproductibilité. Il s'agit donc d'un effet expérimentalement établi. On peut émettre l'hypothèse que l'émissivité spectrale ainsi mesurée ne rend pas compte de tous les effets du vieillissement naturel.

À cause de la nature intégrale de l'indicateur émissivité apparente, de fortes variations d'émissivité spectrale se traduisent par de petites variations d'émissivité apparente en valeur moyenne bien que la dépendance en température (ratio de l'émission réelle sur l'émission de corps noir) peut être importante (Figure 1) : la température de caractérisation amplifie les variations d'émissivités apparentes.

4.2. Comparaison de l'émissivité apparente des miroirs avant et après vieillissement

La figure 4 compare les émissivités apparentes avant et après vieillissement de chaque échantillon de miroirs verre. Pour les 3 échantillons l'émissivité apparente augmente de manière significative après 1000 heures de vieillissement accéléré, démontrant la sensibilité de l'émissivité apparente au test de vieillissement. On constate également que cet indicateur révèle un comportement au vieillissement accéléré qui dépend de l'âge naturel des verres : très marqué pour Odeillo 1, il est à la limite de la détectabilité pour Odeillo 3 pour lequel le vieillissement naturel était déjà avancé. Après 1000h (20 ans) de vieillissement accéléré, les trois échantillons tendent vers un même état en émissivité apparente.

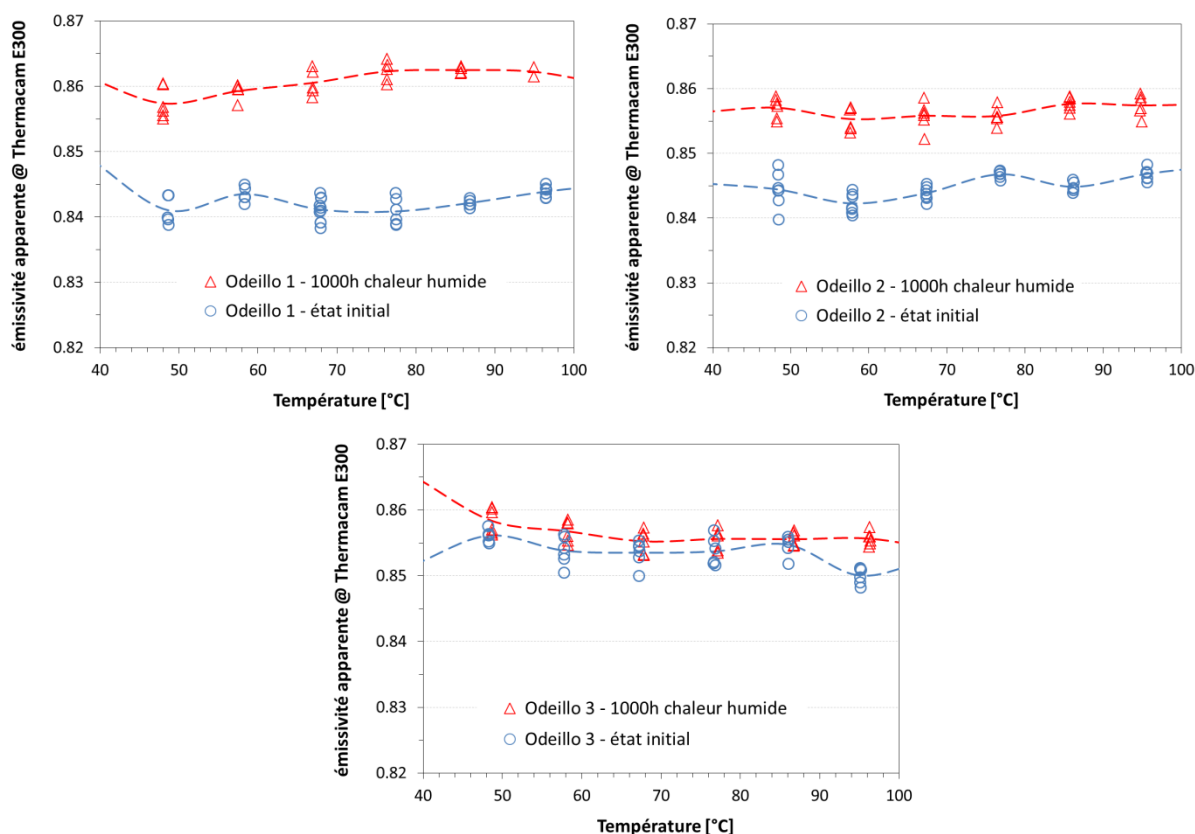


Figure 4 : Emissivité apparente en fonction de la température avant et après vieillissement des miroirs Odeillo (en pointillé : valeur moyenne)

De ces premières constatations expérimentales, nous pouvons supposer raisonnablement que **1)** Le test de chaleur humide reproduit convenablement les dégradations naturelles des verres : l'émissivité apparente établit un état vieilli qui est le même quel que soit leur âge initial **2)** Les temps équivalents de vieillissement sont représentatifs si l'on compare le vieillissement naturel à 20 ans observé sur Odeillo 3 aux 1000h de chaleur humide (équivalent 20 ans) observé sur Odeillo 1 **3)** La cinétique de vieillissement semble rapide dans les premières années (Odeillo1 et Odeillo2) puis lente ou insignifiante ensuite (Odeillo3). La cinétique de vieillissement est par conséquent non linéaire sur la durée de vie des miroirs.

5. Conclusion et perspectives

La caractérisation des miroirs verre a mis en évidence la pertinence de l'utilisation de l'émissivité apparente comme indicateur de vieillissement. Dans un premier temps, on constate une différence des valeurs pour les 3 échantillons qui ont été en activité sur les héliostats pendant des durées plus ou moins longues, alors que les mesures spectrales n'ont pas détectées de différences.

Dans un second temps, après traitement des échantillons en vieillissement accéléré en enceinte climatique, l'émissivité apparente des 3 miroirs augmente de manière significative. Cependant, il semble que l'effet du vieillissement soit plus important dans les premières années d'utilisation. Dans le cas des héliostats, la transmittance du verre est bien évidemment déterminante dans l'efficacité globale des systèmes, de même que la couche réfléchissante en face arrière. Cependant, cette dernière est peut-être la plus facile à détecter sachant que la moindre dégradation de réflectivité se traduirait par une absorption en face arrière et donc un échauffement des miroirs détectable dans une approche classique de thermographie. La transmittance verre (et sa réflectivité en face avant) résulte du vieillissement dans des

conditions naturelles. Sa détectabilité est faible. Le processus de vieillissement naturel chez ces matériaux est principalement lié à la diffusion de l'eau et à sa combinaison avec la silice pour former un hydroxyle [11]. Ce dernier présente une très forte signature dans la bande [8–13 μm]. Une autre étude faite sur des céramiques d'alumine montre également une très grande sensibilité des propriétés spectrales de ces matériaux à la porosité dans la gamme [10–25 μm] [12]. Elle laisse à penser qu'il est également possible de quantifier le degré de recristallisation/fissuration des verres toujours dans la bande [8–13 μm].

En perspective, il serait intéressant de réaliser des mesures d'émissivité spectrale après vieillissement afin de déterminer les altérations de surface qui ont eu lieu. Pour confirmer la non linéarité de la cinétique de dégradation, des mesures à des temps plus courts de vieillissement restent à réaliser. Enfin la corrélation entre l'émissivité apparente 8 – 13 μm et les propriétés optiques fonctionnelles (transmittance et réflectivité dans le visible par exemple) est une perspective intéressante.

Références

- [1] Berman, D., Faiman, D., EVA browning and the time-dependence of I-V curve parameters on PV modules with and without mirror-enhancement in a desert environment, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 45 (1997), 401-412.
- [2] Vazquez, M., Rey-Stolle, I., Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (2008), 419–433.
- [3] Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C.M.F., Ndiaye, P.A., Sambou, V., Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review, *Solar Energy* 96 (2013), 140-151.
- [4] Riou O., Logerais P. O., Durastanti J. F., Quantitative study of the temperature dependence of normal LWIR apparent emissivity. *Infrared Physics & Technology*, 60 (2013), 244-250.
- [5] Riou O., Logerais P.O., Delaleux F., Durastanti J.F., A self-method for resolving the problem of apparent LWIR emissivity for quantitative thermography up to 130°C. *Infrared Physics and Technology*, in press
- [6] Chrzanowski K., Problem of determination of effective emissivity of some materials in MIR range. *Infrared physics & technology*, 36(1995), 679-684.
- [7] Standard IEC 61215, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval.
- [8] Riou O., Durastanti J.F., Tortel V. (2006). Evaluation of error in temperature starting from the Slit Response function and calibration curve of a thermal focal plane array camera. *Quantitative Infrared Thermography–QIRT 2006*
- [9] ASTM E1862-97e1 (2002). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers.
- [10] Riou O., Guiheneuf V., Delaleux F., Logerais P.O., Durastanti J.F. Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials (soumis à Measurement)
- [11] Agarwal, A., & Tomozawa, M. (1997). Surface and bulk structural relaxation kinetics of silica glass. *Journal of non-crystalline solids*, 209(3), 264-272.
- [12] 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.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet ANR DryRSP.