



Etude du vieillissement des verres : corrélation entre émissivité apparente (IR) et transmittance (visible)

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

Laboratoire CERTES, IUT de Sénart-Fontainebleau, Université Paris Est Créteil, 36 rue Georges Charpak,
77567 Lieusaint

vincent.guiheneuf@etu.u-pec.fr, fabien.delaleux@u-pec.fr, olivier.riou@u-pec.fr, pierre-olivier.logerais@u-pec.fr, durastanti@u-pec.fr

Résumé :

Le verre joue un rôle majeur comme protection supérieure, substrat et piégeage de la lumière dans la plupart des systèmes PV. Cependant, des travaux ont montré qu'au cours de sa durée de vie, un panneau solaire photovoltaïque perd entre 10 et 15% de son rendement, essentiellement à cause de pertes optiques. Nous avons testé une méthode de contrôle non destructif et non intrusif permettant de diagnostiquer l'état de vieillissement du verre sodocalcique, à l'aide d'une caméra LWIR. La caractérisation du verre sodocalcique exposé à la chaleur humide durant 1000 h a mis en évidence la pertinence de l'utilisation de l'émissivité apparente comme indicateur de vieillissement. Deux cinétiques de dégradation sont alors apparues lors du vieillissement accéléré. Nous avons également montré la correspondance entre vieillissement naturel et vieillissement accéléré sous UV. Les modifications provoquées par le vieillissement sous UV sont qualitativement identiques pour les spectres de transmittance dans la gamme [300-2300 nm], au contraire du vieillissement sous chaleur humide.

Mots clés : vieillissement, chaleur humide, UV, verre sodocalcique, émissivité apparente, transmittance

Thème : 2 Energies renouvelables

1. Introduction

La faculté de prédire la puissance délivrée tout au long de l'exploitation de l'installation photovoltaïque (PV) est d'une importance capitale pour définir la rentabilité de l'installation. L'identification des mécanismes de dégradation, à travers des essais de vieillissement naturel ou accéléré, peut permettre d'obtenir rapidement des améliorations sur la durée de vie des systèmes PV.

L'objectif de ce travail est de tester une méthode de contrôle non destructif et non intrusif permettant de diagnostiquer l'état de vieillissement des systèmes solaires photovoltaïques (PV). En effet, des travaux précédents ont montré qu'au cours de sa durée de vie, un panneau solaire photovoltaïque perd entre 10 et 15% de son rendement, essentiellement à cause de pertes optiques [1 - 3]. La cellule photovoltaïque est encapsulée par de l'EVA et du verre, qui sous l'effet de diverses agressions climatiques (chaleur, humidité, rayonnement UV, etc...) perdent en transmittance dans le visible et ainsi entraînent une chute du rendement global du système.

Il est intéressant de pouvoir quantifier l'évolution de ce paramètre optique par une méthode ne nécessitant pas un arrêt de fonctionnement ou le prélèvement d'un échantillon. Au cours d'une étude précédente, nous avons démontré la potentialité de l'utilisation de l'émissivité apparente comme indicateur de vieillissement des matériaux comme le verre, quantifiable à l'aide d'une caméra thermique [4]. Le but est ici de démontrer la corrélation entre l'émissivité apparente dans l'infrarouge [8-13 μm] et la transmittance dans le visible du verre des systèmes solaires. En effet, le verre joue un rôle majeur comme protection supérieure, substrat et piégeage de la lumière. L'emploi du verre est dû à son excellente transmission des photons, la possibilité de déposer différents revêtements (antireflet ou couche transparente conductrice) et de réaliser une texturation de surface, tout en ayant une très bonne résistance aux UV et à l'érosion.

2. Moyens expérimentaux

2.1. Echantillon de verre utilisé

Notre choix s'est porté sur un verre commercial de type sodocalcique de 2mm d'épaisseur, sans revêtement spécifique ni texturation de surface. Il est admis que d'autres formulations de verre, telles que les verres aluminosilicaté ou borosilicaté, résistent bien mieux que le verre sodocalcique aux tests de vieillissement accéléré. Cependant, ce verre est moins cher et *a fortiori* très répandu dans les applications solaires. Il faut donc déterminer s'il est suffisamment fiable et résistant aux contraintes environnementales extérieures durant une longue période (supérieure à 30 ans) pour constituer un choix pertinent dans un système PV. La composition du verre étudié est donnée dans le Tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Composition d'un verre sodocalcique classique [5]

	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Autres
Verre sodocalcique	72,5	13,5	0,44	8,35	4,02	0,78	0,12	0,29

Les échantillons utilisés sont des échantillons de verre sodocalcique de 50 x 50 mm² et d'une épaisseur de 2 mm. Ces échantillons sont soumis à deux conditions environnementales différentes chaleur humide et rayonnement UV.

2.2. Moyens de vieillissement accéléré

Des équipements permettant de réaliser des tests de vieillissement accéléré sont disponibles au laboratoire. Une enceinte climatique Binder réglée en température (-40 à 180°C) et en humidité (0 à 99%) permet de réaliser le test accéléré dit de « chaleur humide » (CH). Cet essai est normalisé et utilisé pour la certification des panneaux solaires 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 [6].

Le test d'exposition aux UV se fait dans une enceinte INVE 96 équipée d'un plateau tournant. La source lumineuse se compose d'une lampe en quartz pur d'une puissance de 500 W qui irradie un spectre UV total (plage [180 – 450 nm]). La dose UV incidente peut être modulée entre 600 et 2075 W/m² selon la hauteur du plateau. L'enceinte est également équipée d'une lampe IR en quartz qui permet de contrôler la température d'environnement. Nous avons choisi de réaliser nos tests à 60°C en conformité avec l'essai de pré-conditionnement aux UV, mentionné dans la norme IEC 61215 [6].

2.3. Moyens de caractérisation

2.3.1. Caractérisation de l'émissivité apparente

L'émissivité apparente apparait dans l'équation radiométrique qu'utilisent implicitement tous les imageurs thermiques : ce paramètre $\varepsilon_{\Delta\lambda}(T)$ mesure le thermosignal d'émission de la cible rapporté à un corps noir à la même température. 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 respectivement 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 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 et d'émission) et de la courbe d'étalonnage du système [7, 8]. 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.

Un banc de caractérisation de l'émissivité apparente a été développé en interne (figure 1). Le mesurage de l'émissivité apparente suppose donc la connaissance de la température de l'émetteur. Celle-ci est contrôlée sur trois niveaux :

1. une référence isotherme est fournie par un bloc en acier de $150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$ scellé dans un ciment réfractaire de 150 mm d'épaisseur. Un régulateur PID nous permet de fixer la température du bloc dans la gamme $[20^\circ\text{C} - 120^\circ\text{C}]$ avec une non-uniformité de 0,5% de la consigne.

2. une pastille de graphite naturel expansé ($50 \times 50 \times 6 \text{ mm}^3$, épaisseur 6 mm) est placée en face arrière de l'échantillon (figure 1a). Sa diffusivité thermique ($1,4 \text{ cm}^2/\text{s}$) assure ainsi une thermalisation efficace de l'échantillon. Le montage comprime le GNE dans un rapport de 1:3 en améliorant le contact thermique de l'échantillon sur le bloc isotherme.

3. Le troisième niveau de contrôle est fourni par une entretoise en papier de 2 mm d'épaisseur (figure 1b). 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. 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.

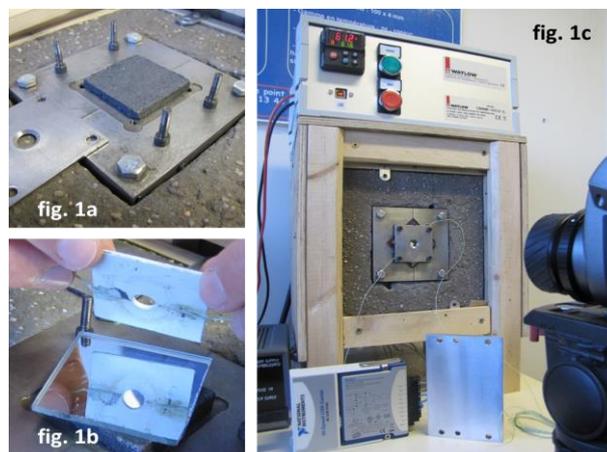


Figure 1 : Banc de caractérisation de l'émissivité apparente

Les températures radiométriques sont évaluées au moyen d'une caméra thermique commerciale (Thermacam E300) utilisée dans la gamme $[40^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}]$. La bande spectrale de détection a été quantifiée à $[8 - 13 \mu\text{m}]$ [8]. La distance cible-caméra est fixée à 30 cm (distance minimale de mise au point de la caméra). Les températures apparente et réfléchie sont obtenues en réglant l'«émissivité» à 1 et la distance à zéro. La température réfléchie est évaluée à l'entrée de la cavité 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.

À 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 énumérées ci-dessous:

- Mesurage des températures de contact,
- Evaluation de la température de l'émetteur à partir de la température de lèvre,
- Mesurage des températures radiométriques,
- 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 le mesurage de l'émissivité avec 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%.

2.3.2. Caractérisation de la transmittance et de la réflectivité

La transmittance et la réflectivité des échantillons de verre ont été mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre PerkinElmer (Lambda 750 UV/Vis/NIR), équipé d'une sphère intégrante 60 mm. Les données de transmittance et de réflectance sont prises tous les 2 nm entre 190 et 2500 nm. L'exactitude des mesures est estimée à $\pm 0,001$ unité.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Vieillissement accéléré sous chaleur humide

Pour réaliser cette étude nous avons utilisé 28 échantillons de verre sodocalcique 5 x 5cm² de 2mm d'épaisseur. Deux échantillons initiaux (échantillons 1 et 2) ont été caractérisés par mesures d'émissivité apparente et de transmittance/réflectivité : ces mesures nous serviront à déterminer la base pour le calcul des variations de ces propriétés optiques. Nous utilisons ensuite 20 échantillons (échantillons 3 à 22) soumis au test de chaleur humide (CH) qui seront caractérisés 2 par 2 toutes les 50 h d'exposition (émissivité apparente et transmittance/réflectivité). Les derniers échantillons (échantillons 23 à 28) seront caractérisés 2 par 2 après 700 h, 900 h et 1000 h d'exposition à la CH.

3.1.1. Mesure de l'émissivité apparente du verre

La figure 2 présente les mesures de l'émissivité apparente en fonction de la température d'émission pour des échantillons de verre soumis à différentes durée d'exposition à la chaleur humide. Celles-ci sont effectuées pour des températures d'émission comprise entre [50°C - 110°C].

On constate que, pour l'échantillon initial, l'émissivité apparente décroît légèrement avec la température d'émission. Elle passe de 0,855 (à 58°C) à 0,847 (à 108°C). Pour un échantillon ayant subi un léger vieillissement sous CH (inférieur à 200 h), l'émissivité apparente est globalement constante avec la température d'émission. Sa valeur reste supérieure à celle de l'échantillon initial. Lorsque l'échantillon est soumis à une exposition prolongée à la CH (supérieure à 500 h), l'émissivité apparente se stabilise à 0,859-0,860.

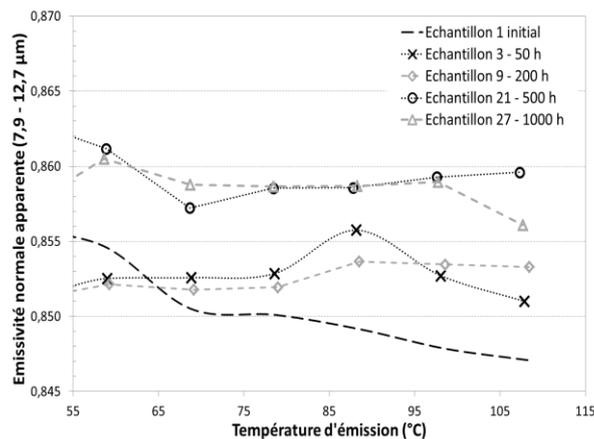


Figure 2 : Emissivité apparente en fonction de la température d'émission pour différents échantillons de verre sodocalcique : non vieilli et exposés à 50 h, 200 h, 500 h et 1000 h sous CH.

3.1.2. Mesures de transmittance et de réflectivité du verre

Les mesures de transmittance et de réflectivité sur la plage 300 – 800 nm sont présentées dans la figure 3a. Les courbes sont obtenues en moyennant les mesures de deux échantillons de chaque type (non vieilli et exposé 1000 h sous CH) pour une plus grande fiabilité dans la mesure. La précision des mesures est estimée à $\pm 0,001$

unité. On constate ainsi que la transmittance globale augmente après exposition durant 1000 h sous CH. Cette augmentation de transmittance est plus importante sur la plage 375 – 500 nm (figure 3b). À l’inverse, la réflectivité diminue après exposition à la chaleur humide visiblement dans une même proportion. On peut ainsi en déduire que l’absorption des échantillons reste inchangée.

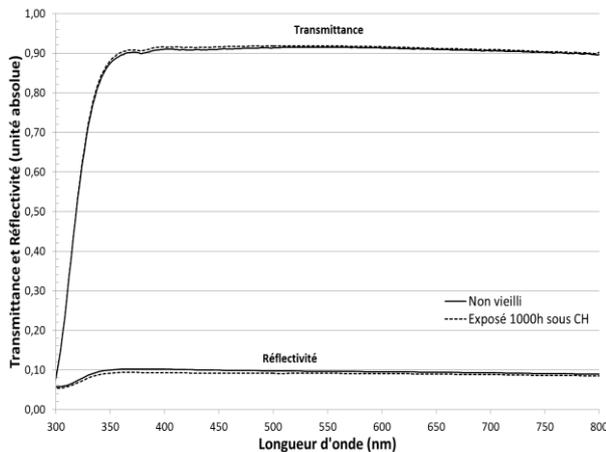


Figure 3a : Transmittance et réflectivité de deux échantillons de verre sodocalcique de 2 mm : non vieilli et exposé durant 1000 h sous CH.

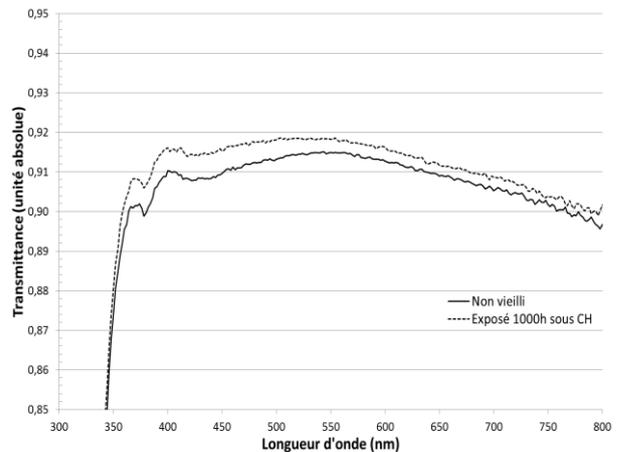


Figure 3b : Transmittance de deux échantillons de verre sodocalcique de 2 mm : non vieilli et exposé durant 1000 h sous CH.

3.1.3. Corrélation entre émissivité apparente et transmittance

À partir des données brutes présentées ci-dessus, nous avons calculé les écarts d’émissivité apparente entre les échantillons exposés et l’échantillon initial (qui définit la base). Chaque échantillon étant définis par son temps d’exposition à la chaleur humide, la figure 4 présente donc les écarts d’émissivité apparente par rapport à la base (échantillon initial) en fonction du temps d’exposition (en heures). Les écarts sont donnés pour deux températures d’émission jugées caractéristiques : 68°C et 98°C. La répétabilité des mesures est d’environ 0,003.

On observe, dans un premier temps, un accroissement de l’écart avec le temps d’exposition quelle que soit la température d’émission choisie (68°C ou 98°C). Il semble qu’après 500 h d’exposition sous CH l’écart d’émissivité apparente atteint un palier à 0,007 et 0,010, selon la température d’émission (respectivement 68°C et 98°C).

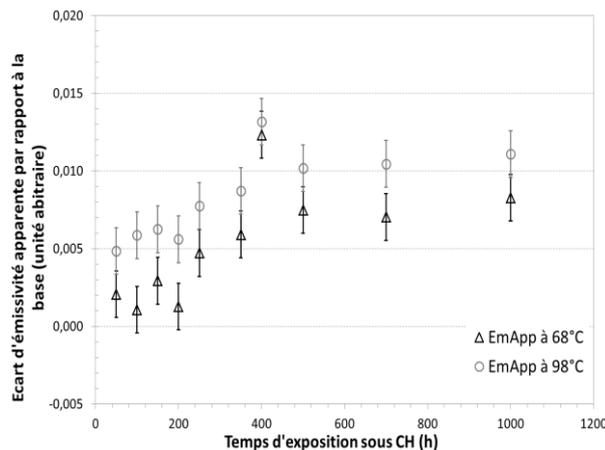


Figure 4 : Ecart par rapport à la base de l’émissivité apparente mesurée à 68°C (Δ) et 98°C (\circ) en fonction du temps d’exposition sous CH des échantillons de verre sodocalcique 2 mm.

Nous avons effectué la même démarche concernant la transmittance de ces échantillons. La figure 5 présente la transmittance intégrée sur deux plages de longueur d’onde : UVA et UVB (290-400 nm) et visible (400-800 nm). Cette figure met en évidence une modification de la transmittance plus importante dans les UV que dans le visible. En effet, l’écart de transmittance intégrée sur 290-400 nm augmente linéairement avec le temps d’exposition à la chaleur humide, pour atteindre 0,013 après 1000 h. En ce qui concerne l’écart de transmittance

intégrée sur la plage de longueur d'onde 400-800 nm, le phénomène semble plus complexe. L'écart de transmittance atteint un maximum (0,005) pour les échantillons ayant subi 500 h de CH. Après 500 h de CH, on ne constate pas de variation significative dans le visible par rapport aux échantillons initiaux. Après 1000 h de CH, l'écart de transmittance se stabilise à 0,0035. Ainsi, la transmittance dans le visible augmente tout d'abord avec le temps d'exposition à la chaleur humide puis se stabilise après 500 h.

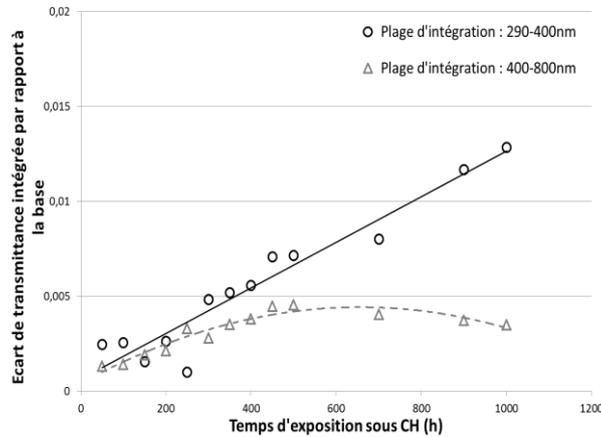


Figure 5 : Ecart de transmittance intégrée sur 290-400 nm (○) et sur 400-800 nm (△) en fonction du temps d'exposition sous CH des échantillons de verre sodocalcique 2 mm.

Nous nous intéressons maintenant à la corrélation de ces deux indicateurs dans le but d'établir ou non une correspondance entre variation de l'émissivité apparente (entre 8–13 μm) et variation de la transmittance intégrée. Pour cela, nous superposons les écarts d'émissivité apparente à 68°C avec les écarts de transmittance intégrée sur les plages de longueur d'onde : 400-800 nm (figure 6a) et 290-400 nm (figure 6b). Le choix de l'émissivité apparente s'est porté sur celle obtenue à 68°C car elle se rapproche le plus de la température de fonctionnement d'un système PV standard.

On constate, sur la figure 6a, que l'allure des deux courbes, écart d'émissivité apparente et écart de transmittance intégrée sur 400-800 nm en fonction du temps d'exposition sous CH, sont relativement proches. Les écarts par rapport à la base augmentent linéairement jusqu'à 500 h d'exposition. Ensuite, les écarts d'émissivité apparente et de transmittance intégrée sur 400-800 nm se stabilisent entre 500 h et 1000 h : respectivement à 0,007 et 0,004. On notera que les écarts d'émissivité apparente sont plus importants après stabilisation que ceux pour la transmittance intégrée et permet donc une meilleure quantification du vieillissement du verre. La corrélation entre ces deux indicateurs est cependant démontrée.

Si l'on compare ces écarts d'émissivité apparente avec la transmittance intégrée, cette fois-ci, sur la plage 290-400 nm, on remarque qu'ils sont identiques en valeur absolue jusqu'à un temps d'exposition de 700 h sous CH pour atteindre 0,008. Pour les échantillons à 900 h et 1000 h, les écarts de transmittance intégrée sur 290-400 nm continuent d'augmenter et atteignent 0,013 après 1000h. Ceci traduit une différence de comportement entre l'émissivité apparente et la transmittance intégrée sur 290-400 nm. En effet, cette dernière croit linéairement avec le temps d'exposition à la CH. Le test de CH conduit donc à une augmentation significative de la transmittance dans les UVA/UVB.

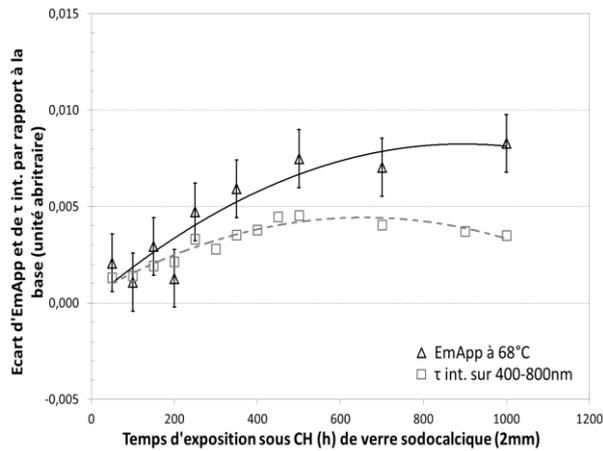


Figure 6a : Comparaison de l'écart d'émissivité apparente (Em_{App}) et de transmittance intégrée ($\tau_{int.}$) sur 400-800 nm, en fonction du temps d'exposition sous CH des échantillons de verre sodocalcique de 2 mm.

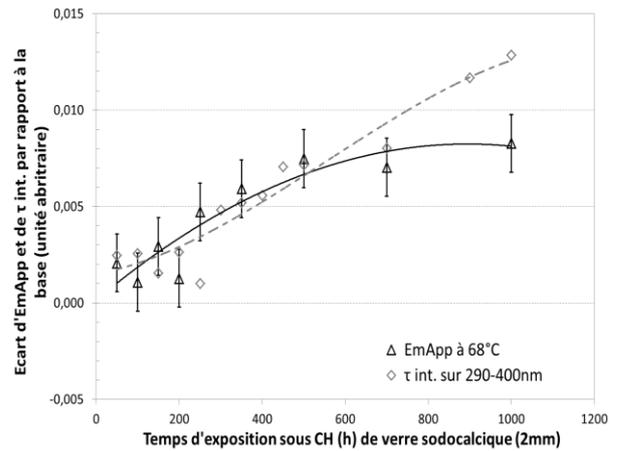


Figure 6b : Comparaison de l'écart d'émissivité apparente (Em_{App}) et de transmittance intégrée ($\tau_{int.}$) sur 290-400 nm, en fonction du temps d'exposition sous CH des échantillons de verre sodocalcique de 2 mm.

3.2. Vieillesse accélérée sous UV

Nous avons choisi d'exposer des échantillons de verre sodocalcique à un spectre UV total (plage [180 – 450 nm]). Nous avons travaillé avec une dose d'UV de 2075 W/m². La température d'environnement a été maintenue à 60°C, conformément à la norme IEC 61215 [6]. Nous présentons ici les premiers résultats, les essais étant encore en cours.

Les mesures de transmittance et de réflectivité sur la plage 300 – 800 nm sont présentées sur la figure 7a. Les courbes sont obtenues en moyennant les mesures de deux échantillons de chaque type (non vieilli et exposé 144 h sous UV) pour une plus grande fiabilité dans la mesure. La précision des mesures est estimée à $\pm 0,001$ unité. Après exposition aux UV, il apparaît que la transmittance globale diminue alors que la réflectivité augmente. On peut supposer que l'absorption des échantillons reste inchangée. Cette diminution de transmittance est de l'ordre de 0,01 sur la plage 400 – 550 nm.

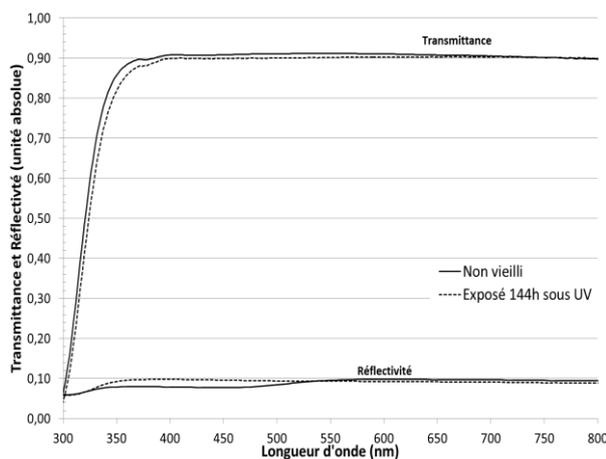


Figure 7a : Transmittance et réflectivité sur la plage 300-800 nm de verre sodocalcique de 2 mm : non vieilli et exposé durant 144 h sous UV.

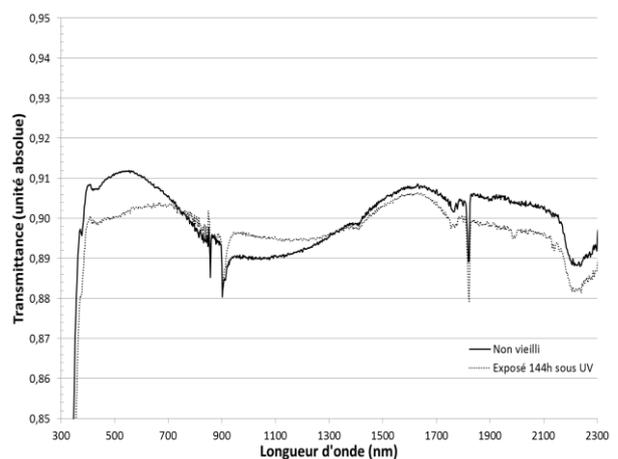


Figure 7b : Transmittance sur la plage 300-2300 nm de verre sodocalcique de 2 mm : non vieilli et exposé durant 144 h sous UV.

La figure 7b présente les mesures de transmittance sur la plage de longueur d'onde 300-2300 nm pour les échantillons non-vieillis et exposés 144h sous UV. L'échantillon exposé aux UV présente :

- Une diminution de la transmittance sur la plage [350-700 nm]
- Une augmentation de la transmittance sur la plage [900-1300 nm]
- Une diminution de la transmittance sur la plage [1400-2300 nm]

4. Discussion

Lind *et al.* ont publié des travaux sur le vieillissement naturel de verres sodocalciques (d'épaisseur 2–5mm) utilisés dans les héliostats durant plus de 30 ans en environnement semi-aride [11]. Ils ont identifiés 2 contraintes environnementales pouvant jouer un rôle important dans la dégradation des verres : 1) altération physique du verre par irradiation UV et 2) diffusion de l'eau dans le verre.

4.1. Irradiation UV dans le verre

La figure 7 présente la transmittance et la réflectivité sur la plage 300-2500 nm d'un échantillon de verre ayant une zone exposée aux agressions extérieures durant 30 ans et une autre non-exposée (protégée par le cadre du module). La transmittance évolue significativement sur deux bandes spectrales ; elle diminue sur la plage 350-400 nm et augmente sur la plage centrée autour de 1100 nm. Ces deux bandes spectrales correspondent respectivement à la plage d'absorption des ions Fe^{3+} et Fe^{2+} . A l'état natif, les deux formes coexistent. Sous exposition UV, l'auteur fait l'hypothèse d'une oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} [11]. Cela se traduit par une baisse de l'absorption centrée sur 1100 nm et une augmentation de celle autour de 380 nm. Il est aussi possible que la coordinence du Fe^{2+} ait été altérée, entraînant un changement du coefficient d'absorption à 1100 nm bien que cette hypothèse n'explique pas l'augmentation de l'absorption autour de 380 nm. Cet échantillon présente également une bande d'absorption de l'eau à 2220 nm laissant supposer que l'eau ait pu diffuser dans les couches supérieures du verre. Quant au spectre de réflectivité, il ne subit pas de modification notable après vieillissement naturel.

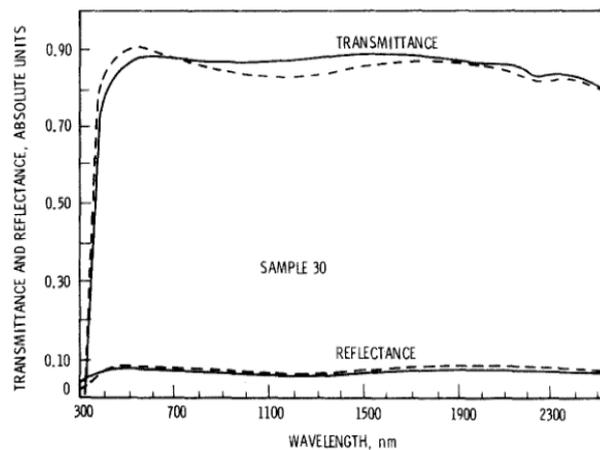


Figure 7. Transmittance et réflectivité spectrale hémisphérique d'un échantillon de verre du site de Hanford (USA) : zone exposée (—) et zone non-exposée (- - -) [11]

4.2. Diffusion de l'eau dans le verre

Le test de chaleur humide hydrate le verre par un processus de diffusion thermiquement activé. L'hydratation provoque des modifications structurelles et chimiques du verre pouvant impacter ses propriétés optiques et infrarouges.

Selon Davis et Tomozawa, l'incorporation de l'eau dans le verre réduit la viscosité, l'indice de réfraction et la densité du verre tandis qu'elle cause une augmentation de la dilatation thermique, du taux de cristallisation et de la résistance aux dommages radiatifs [12]. De plus, la diffusion de l'eau influence le taux d'oxydation du silicium. Leur étude a révélé des changements structuraux sur du verre hydraté à haute température (supérieure à 350°C).

Doremus a proposé des explications à ces changements structuraux [13]. Il a tout d'abord défini l'eau moléculaire comme l'ensemble des espèces liées à l'eau et qui diffusent dans le verre. Il a également montré que, durant l'hydratation à haute température, l'eau moléculaire pénètre dans le verre jusqu'à atteindre un site favorable où elle réagira pour former des groupes silanoles immobiles (aussi appelé groupes hydroxyles), tel que :



Il semble que la relaxation accéléré du verre durant l'hydratation à haute température conduit localement à une réduction de la viscosité, provoquée par la modification de l'angle des liaisons Si-O-Si ainsi que leur rupture pour former les groupements silanols SiOH [12].

La pénétration de l'eau dans le verre peut donc se résumer par une diffusion de l'eau moléculaire suivie par une réaction réversible entre cette molécule d'eau et le réseau silicaté pour former des groupements hydroxyles immobiles. On doit garder en tête que ces études sont réalisées à des températures bien supérieures à 85°C (supérieures à 350°C) ce qui nous empêche de transposer ces effets au test de chaleur humide et d'identifier les mécanismes modifiant les propriétés optiques et infrarouge du verre subissant le test.

On soulignera enfin que la réactivité du verre dépend de sa composition et peut influencer grandement sa sensibilité à la corrosion. Par exemple, la silice pure ne contient que des sites tétraédriques qui résistent bien à l'hydrolyse : le diamètre du pore formé par les tétraèdres SiO₄ assemblés est trop faible pour permettre une diffusion rapide de l'eau moléculaire. La présence d'Al₂O₃ augmente la résistance à la corrosion d'un verre de silicate car il ne contient aucun oxygène non pontant (lié à un seul atome de silicium) et agit donc comme une barrière de diffusion [14].

4.2. Pertinence des tests de vieillissement accéléré : CH et UV

Concernant le verre seul, le vieillissement naturel montre une diminution de la transmittance alors que ce test conduit à son augmentation. Le test de CH ne rend donc pas compte des variations naturelles de transmittance du verre.

On peut donc s'interroger sur la pertinence du test de CH pour simuler le fonctionnement des systèmes PV en conditions extérieures. Des études ont montré que 1000 h sous CH (85°C/85% HR) correspondent à une baisse de la puissance maximale de 10%, principalement à cause de la pénétration de l'humidité. Elle est due à la perméabilité des matériaux (joint, support,...) induisant corrosion et délamination. Ainsi, selon Phinikarides, si on suppose une moyenne linéaire du taux de dégradation de 0.8% par an (taux généralement constaté pour le c-Si [3]), alors le test de vieillissement sous CH serait équivalent à seulement 12,5 ans en exposition extérieure [15]. Ne connaissant pas le facteur d'accélération, nous ne pouvons obtenir une corrélation suffisante entre taux de dégradation sous CH et en fonctionnement normal sur le terrain à cause d'un nombre important de variables (climat, technologie PV, raccordement des systèmes, ...). De plus, ces conditions (85°C / 85% HR) n'apparaissent probablement jamais en conditions réelles car les modules tendent à sécher à de hautes températures. L'absorption de l'humidité se fait généralement à basse température [15].

En revanche, on constate que le test de vieillissement sous UV semble plus adapté pour rendre compte du vieillissement naturel du verre. Cependant, il faut prolonger la durée d'exposition aux UV afin d'obtenir des résultats qualitativement identiques à ceux de Lind : $\Delta\tau = 2-3\%$ pour $\lambda \approx 500 \text{ nm}$. Ceci nous permettra de déterminer un facteur d'équivalence au vieillissement selon la dose UV incidente choisie.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que le test sous UV a un effet de vieillissement sur le verre alors que la chaleur humide semble plus adaptée aux polymères encapsulant utilisés dans les modules PV. Le vieillissement naturel d'un système PV pourrait être représenté par une combinaison de ces deux tests.

5. Conclusion

La caractérisation du verre sodocalcique exposé à la chaleur humide a mis en évidence la pertinence de l'utilisation de l'émissivité apparente comme indicateur de vieillissement. Les résultats ont montré une corrélation entre les écarts par rapport à la base de l'émissivité apparente et la transmittance intégrée dans le visible. Les écarts d'émissivité apparente sont plus significatifs lors de la seconde cinétique de vieillissement que ceux pour la transmittance intégrée. L'émissivité apparente à 68°C semble donc être un meilleur indicateur pour quantifier le vieillissement du verre sous CH que la transmittance intégrée dans le visible.

Il a été mis en évidence deux cinétiques de vieillissement lors de l'exposition sous CH. Dans un premier temps (inférieur à 500 h), les modifications structurales sont importantes et se traduisent par une augmentation linéaire de la transmittance dans le visible et de l'émissivité apparente par rapport à l'échantillon initial. Après

500 h d'exposition, on ne constate plus de variations significatives. Cependant, ce vieillissement accéléré sous CH ne semble pas retranscrire le vieillissement naturel du verre.

Nous avons également montré un accord qualitatif de la transmittance en vieillissement naturel et accéléré sous UV. Les modifications provoquées par le vieillissement sont qualitativement identiques pour les spectres de transmittance dans la gamme [300-2300 nm]. Pour le verre, le vieillissement sous UV apparaît aussi agressif que sous CH.

En perspective, il est nécessaire de poursuivre la caractérisation des échantillons de verre exposés à la CH afin d'identifier les mécanismes de dégradation mis en jeu et être à même d'expliquer les différences constatées avec le vieillissement naturel. Des techniques d'analyse chimiques (FTIR, ellipsométrie et MEB) sont envisagées. Il serait aussi intéressant de poursuivre le vieillissement sous UV afin d'obtenir des dégradations de la transmittance qualitativement identiques à celles de Lind (ex: $\Delta\tau = 2-3\%$ pour $\lambda \approx 500$ nm). Ceci nous permettra de déterminer un facteur d'accélération fiable pour déterminer la durée d'exposition aux UV nécessaire pour simuler un temps t en vieillissement naturel.

Nomenclature

ε	Emissivité	<i>app</i>	apparente	GNE	graphite naturel expansé
λ	Longueur d'onde	<i>CH</i>	chaleur humide	<i>HR</i>	humidité relative
τ	Transmittance	<i>c-Si</i>	silicium cristallin	int.	intégrée
$\Delta\lambda$	Bande spectral	EmApp	émissivité apparente	MEB	Microscope Electronique à Balayage
		<i>env</i>	environnement	<i>PV</i>	photovoltaïque
		EVA	éthylène-acétate de vinyle	<i>T</i>	température, °C
		FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier	<i>UV</i>	ultraviolet

Références

- [1] D. Berman, D. Faiman, 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*, Volume 45, Pages 401-412, 1997.
- [2] M. Vazquez, I. Rey-Stolle, Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 16, Pages 419-433, 2008.
- [3] D. C. Jordan et S. R. Kurtz, Photovoltaic Degradation Rates - an analytical review, *NREL Journal Article 5200-51664*, 2012.
- [4] F. Delaleux, O. Riou, H. Espargillière, P-O. Logerais, R. Olivès, X. Py, J-F. Durastanti, Caractérisation du vieillissement par émissivité apparente des miroirs verre des héliostats, *Congrès SFT 2015 La Rochelle*.
- [5] J. Phalippou, Verres - Aspects théoriques, *Techniques de l'Ingénieur*, 2001.
- [6] Standard IEC 61215, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval.
- [7] O. Riou, P-O. Logerais, J-F. Durastanti, Quantitative study of the temperature dependence of normal LWIR apparent emissivity, *Infrared Physics & Technology*, Volume 60, Pages 244-250, 2013.
- [8] O. Riou, P-O. Logerais, F. Delaleux, J-F. Durastanti, A self-method for resolving the problem of apparent LWIR emissivity for quantitative thermography up to 130°C. *Infrared Physics and Technology*, Volume 67, Pages 504-513, 2014.
- [9] ASTM E1862-97e1, Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers, 2001.
- [10] O. Riou, V. Guiheneuf, F. Delaleux, P-O. Logerais, J-F. Durastanti, Accurate methods for single-band apparent emissivity measurement of opaque materials (soumis à *Measurement*).

- [11] M. A. Lind et J. S. Hartman, Natural aging of soda-lime-silicate glass in a semi-arid environment, *Solar Energy Materials*, Volume 3, Pages 81-95, 1980.
- [12] K.M. Davis et M. Tomozawa, Water diffusion into silica glass: structural changes in silica glass and their effect on water solubility and diffusivity, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 185, Pages 203-220, 1995.
- [13] R. H. Doremus, dans *Reactivity of solids*, de J. W. Mitchell, R. C. Devries, R. W. Roberts, P. Cannon, Editions Wiley, Page 667, 1969.
- [14] S. Portal, Corrosion de verres de silicate : analyse texturale de la couche d'altération, *Thèse à l'Université Montpellier II*, 2010.
- [15] A. Phinikarides, N. Kindyni, G. Makrides, G. Georghiou, Review of photovoltaic degradation rate methodologies, *Renewable and Sustainable Energy Review*, Volume 40, Pages 143-152, 2014.
- [16] J. H. Wohlgemuth et S. Kurtz, Using accelerated testing to predict module reliability, *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011.