

Quantification des effets de l'érosion sur un verre sodocalcique par la réflectivité bidirectionnelle

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 les performances énergétiques des systèmes à énergie solaire en diminuant la transmittance des verres sodocalciques employés. La gravité de l'érosion peut être quantifiée au moyen de la réflectance bidirectionnelle. Cette dernière est fournie en exploitant les capacités métrologiques des caméras thermiques LWIR-Vox. L'approche développée est non-intrusive et non-destructive. Ce résultat ouvre la possibilité de développer un nouvel outil pour la cartographie de surfaces vitreuses exposées afin de localiser les zones érodées et d'en indiquer leur sévérité.

Nomenclature

ρ_h	Réflectance directionnelle hémisphérique	TF	Transformée de Fourier
ρ_s	Composante spéculaire de la réflectance	\mathcal{F}	Amplitude du fondamental du spectre
ρ_d	Composante diffuse de la réflectance	r_{bd}	Réflectance bidirectionnelle
Φ_i	Signal d'émission	θ_i	Angle d'incidence
Φ_r	Signal réfléchi	θ_r	Angle de réflexion
O_s	Signal objet en format numérique		

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 sodocalcique 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 transmittance dans le visible affectant considérablement l'efficacité énergétique des systèmes. Parmi tous les processus d'altération, 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. Nos travaux visent à développer un outil de contrôle non-destructif et non-intrusif exploitant les capacités métrologiques et d'imagerie des caméras thermiques. Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre l'indicateur émissivité apparente à travers une approche thermique. Cependant, cette approche est intrusive et reste difficilement utilisable en conditions in-situ [2]. La réflectivité bidirectionnelle en régime oscillant devrait pallier cette insuffisance. Nous avons choisi de tester ses capacités pour la détection de l'érosion éolienne chez des verres sodocalciques. L'érosion affecte la réflectivité

et l'absorptivité des surfaces. Dans cet article, nous caractériserons les effets de l'érosion sur la réflectance spectrale des verres. Nous montrerons ensuite que la réflectivité bidirectionnelle présente une forte sensibilité à l'érosion. La corrélation de la réflectivité bidirectionnelle avec la transmittance dans le domaine du visible sera établie, permettant d'évaluer la gravité de l'érosion en termes des performances énergétiques des systèmes. L'exploitation de la réflectance bidirectionnelle LWIR pour la cartographie de l'état physico-chimique des surfaces sera discutée en conclusion.

2. Échantillons érodés

Nous avons érodé des plaques de verre sodo-calcique au moyen d'une sableuse industrielle. Le processus d'érosion est expliqué dans la référence [2]. Une caractérisation en transmittance [300nm – 2800nm] est également effectuée dans la référence [2]. Un examen visuel nous a permis de délimiter une surface dont l'érosion est observée uniforme. Il est ensuite possible de quantifier le % moyen d'érosion par un traitement d'imagerie. Les caractérisations présentées dans ce travail se font sur une petite zone choisie aléatoirement. Les résultats de chaque caractérisation sont variables, compte tenu de la dispersion locale du % de surface érodée. Pour tenir compte de ces aléas, nous avons quantifié l'incertitude de type A ($k=2$) par une analyse statistique de 9 zones représentatives pour chaque échantillon. Le résultat est montré dans le tableau 1.

	% moyen d'érosion	Incertitude de type A en \pm
Ech0	1,4	1,0
Ech1	8,2	2,0
Ech2	17,5	3,7
Ech4	40,6	3,9
Ech5	61,8	5,7
Ech6	86,0	6,4
Ech7	98,6	0,3
Ech8	1,6	1,1

Tableau 1 : % de surface érodée et incertitude de type A ($k=2$) associée

3. Réflectances spectrales des verres érodés

L'érosion affecte la réflectivité et l'émissivité des surfaces. Le but de ce paragraphe est d'observer l'évolution de la réflectance directionnelle hémisphérique, de sa composante spéculaire et de l'émissivité avec le pourcentage de surface érodée dans le domaine infrarouge [2 μm , 20 μm]. La réflectance spectrale directionnelle hémisphérique est quantifiée au moyen du spectromètre « Perkin Elmer FTIR Spectrometer Frontier » équipé d'une sphère intégrante « Pike ». Chaque spectre enregistré est l'accumulation (moyenne) de 64 spectres consécutifs. L'émissivité du verre est ensuite déduite de la mesure de la réflectance hémisphérique. La composante spéculaire de la réflectance est mesurée par le module « 10Spec » du spectromètre à un angle d'incidence de 10° de la normale. Les réflectances spéculaire et diffuse sont les deux composantes de la réflectance directionnelle hémisphérique. Si ρ_s désigne la composante spéculaire et ρ_d la composante diffuse, alors la réflectance directionnelle hémisphérique ρ_h est donnée par :

$$\rho_h = \rho_s + \rho_d \quad (1)$$

Ayant quantifié la réflectance directionnelle hémisphérique et sa composante spéculaire, la composante diffuse est calculée en utilisant l'équation 1. Dans la figure 1, nous comparons la contribution de la réflexion spéculaire et de la réflexion diffuse pour un échantillon non érodé et dans la figure 2 pour un verre érodé à 48%.

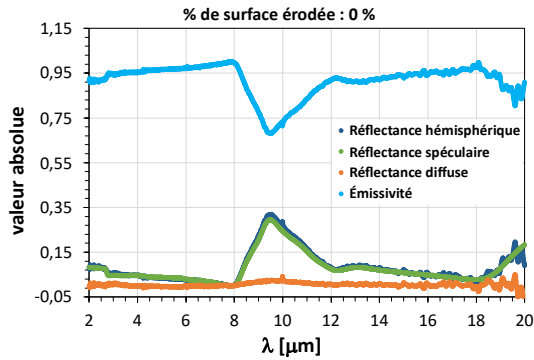


Figure 1 : Contribution de la réflexion spéculaire/diffuse pour un verre non érodé

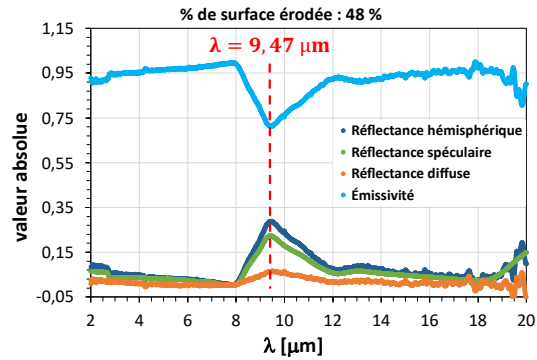


Figure 2 : Contribution de la réflexion spéculaire/diffuse pour un verre érodé à 48%

Nous observons une forte signature spectrale des effets de l'érosion dans la bande LWIR [8 ; 14 μm]. À 48% d'érosion, nous constatons également que la réflectance directionnelle hémisphérique est principalement portée par sa composante spéculaire même si la contribution diffuse est déjà effective. Les extrema en réflectance et en émissivité sont observés à une longueur d'onde de $\lambda = 9,47\mu\text{m}$. Une analyse fine des contributions spéculaire et diffuse en fonction du pourcentage d'érosion est présentée dans la figure 3.

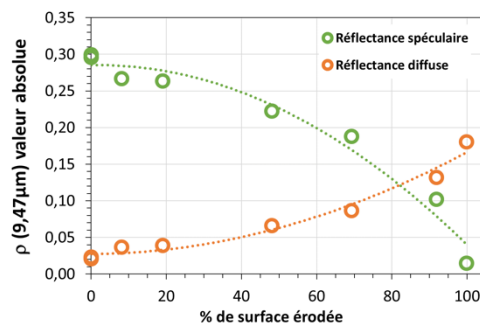


Figure 3 : Évolution en valeurs absolues de la réflectance spéculaire et de la réflectance diffuse en fonction du pourcentage de surface érodée à $\lambda = 9,47\mu\text{m}$

Les contributions spéculaire et diffuse de la réflexion varient avec le pourcentage de surface érodée. La composante spéculaire de la réflectance diminue alors que la composante diffuse augmente. Cependant, la diminution de la composante spéculaire en valeur absolue, est plus prononcée : la réflectance directionnelle hémisphérique diminue avec l'érosion. Elle est compensée par une augmentation de l'émissivité dans la bande LWIR.

En conclusion, la réflectivité bidirectionnelle LWIR se révèle pertinente pour la détection de l'érosion chez le verre du fait 1. elle est portée principalement par la composante spéculaire de la réflectance 2. les effets de l'érosion ont une signature importante dans la bande [8 μm , 14 μm].

4. Réflectivité bidirectionnelle LWIR

La réflectivité bidirectionnelle est quantifiée de manière indépendante en irradiant un échantillon par un environnement thermique oscillant. L'approche expérimentale consiste à émettre un flux pseudo-sinusoïdal Φ_i à une fréquence stabilisée. Une partie de ce signal sera réfléchi par la cible. On appellera le signal réfléchi Φ_r . Ce dernier sera enregistré par une caméra thermique LWIR [8.1 μ m, 13.0 μ m]. Le principe de la mesure est présenté dans la figure 4.

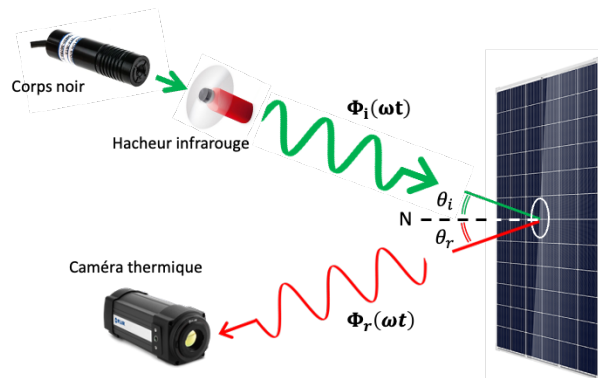


Figure 4 : Mesurage de la réflectivité bidirectionnelle. Les angles d'incidence et de réflexion sont sensiblement identiques

Les thermosignaux sont analysés à partir d'enregistrements vidéos. La vidéo d'émission consiste à quantifier le thermosignal d'émission. La quantification se fait en deux étapes avant/après caractérisation. Dans la première étape, nous positionnons le corps noir + hacheur face à la caméra A325sc à environ 30cm, ce qui correspond au même chemin optique d'émission. Nous enregistrons la vidéo d'émission. Nous extrayons les données de la cavité du corps noir sous forme des vecteurs (temps, thermosignal). Nous déterminons ainsi le chronogramme du signal d'émission contenant environ 8 cycles (512 points). Nous appliquons la transformée de Fourier numérique du chronogramme fenêtré (Hann). L'outil nous donne l'amplitude des composantes fréquentielles du thermosignal d'émission. En fin d'acquisition, nous répétons l'analyse afin de vérifier la stabilité du thermosignal d'émission. Grâce à la stabilité du corps noir, nous n'observons aucune variation significative sur la durée de 10 minutes. En mesure en réflectivité, la caméra est positionnée au moyen de repères assurant une reproductibilité de la distance et de l'angle d'observation. La quantification du thermosignal réfléchi résulte du même traitement que celui appliqué sur le thermosignal d'émission.

Les vidéos sont enregistrées à une fréquence trame compatible avec la fréquence du hacheur. Le rapport des amplitudes des signaux à la fréquence fondamentale \mathcal{F} nous donne la réflectance bidirectionnelle dans la bande spectrale de la caméra :

$$r_{bd} = \frac{\mathcal{F}[TF(\Phi_r)]}{\mathcal{F}[TF(\Phi_i)]} \quad (2)$$

5. Hacheur infrarouge

Un soin particulier a été apporté dans la conception du disque équipant le hacheur : on recherchera un rapport entre le fondamental et le premier harmonique le plus grand possible dans le but d'optimiser l'exactitude de mesure des fondamentaux utilisés dans le calcul de r_{bd} (eq. 2). Le hacheur utilisé est du modèle « model SR540 chopper controller ». Les disques disponibles sont ajourés : en rotation, ils produisent dans l'état une irradiation carrée dont le rapport fondamental/1^{er} harmonique est de 3 :1. À l'aide d'une imprimante 3D « stratasys F170 » [3], nous avons imprimé un disque sous la forme de deux demi-lunes (figure 5) produisant une irradiation pseudo-sinusoïdale dont le rapport est de 6 :1 (figure 6).

La qualité du dispositif est conditionnée par l'exactitude et la stabilité de la source infrarouge utilisée : c'est pourquoi nous associons le hacheur au calibrateur de thermomètres « Fluke 9100 S » que nous avons conditionné en corps noir [4]. L'exactitude en température d'émission est de $\pm 0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ et la stabilité est de $\pm 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ à 50°C [5]. L'émissivité de la cavité est $0,988 \pm 0,008$. La cavité exploitée présente un diamètre de 6,4 mm tandis que l'ouverture maximale des demi-lunes est de 6 mm.



Figure 5 : Corps noir et hacheur permettant de produire un signal pseudo-sinusoïdal

Ce dispositif délivre une irradiation pseudo-sinusoïdale (figure 6)

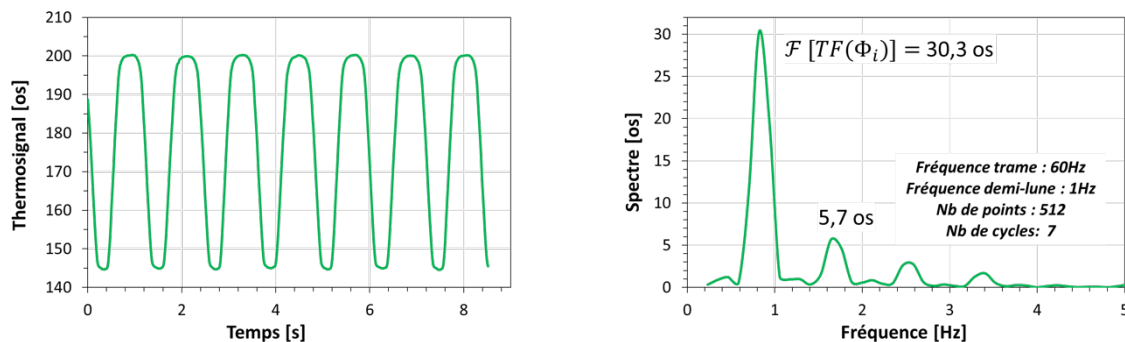


Figure 6 : Chronogramme et spectre du thermosignal d'émission. La température de corps noir est réglée à 50°C . Le thermosignal d'émission est moyenné sur une ligne comportant 9 IFOV. Pour le calcul du spectre, le chronogramme est fenêtré (Hann)

Nous obtenons ainsi l'amplitude du fondamental du signal d'émission. On remarquera le rapport de 6 :1 entre le fondamental et le premier harmonique, améliorant le rapport signal/bruit produit par les demi-lunes comparé à celui produit par des fentes rectangulaires.

6. Dispositif expérimental

Le dispositif comporte le hacheur infrarouge, un porte-échantillon et la caméra LWIR modèle A325sc (figure 7).

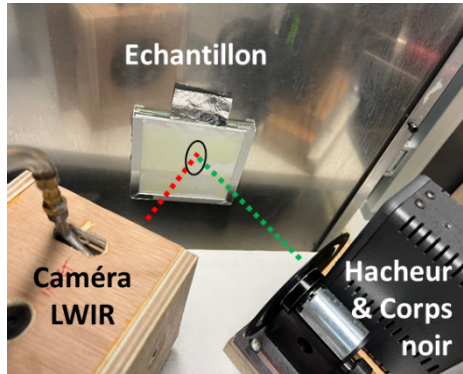


Figure 7 : Dispositif expérimental

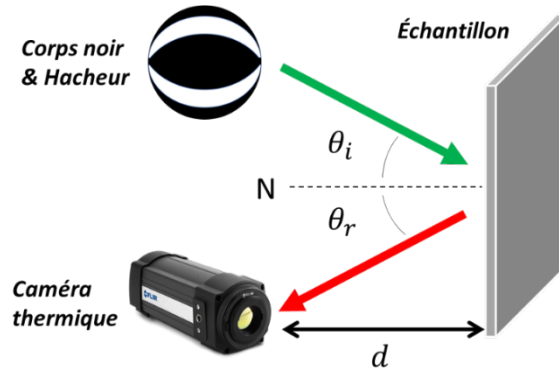


Figure 8 : Chemin optique indiquant les angles d'incidence et de réflexion ainsi que la distance de travail

Le dispositif est fixé sur une planche en bois. Compte tenu de l'encombrement du hacheur, nous avons ouvert les angles tel que $\theta_i = \theta_r \approx 40^\circ$ par rapport à la normale. Les références [6, 7] montrent que les caractéristiques directionnelles restent constantes chez les matériaux isolants ou diélectriques comme le verre tant que les angles d'observation restent inférieurs à 60° . On attend donc le même comportement concernant la réflectance bidirectionnelle. La distance normale entre la caméra/hacheur et le porte échantillon est d'environ 20 cm. Afin de limiter la dérive thermique de la caméra durant l'expérimentation, elle est thermostatée dans une boîte froide [4]. Pour la mesure du signal réfléchi, nous appliquons le même traitement que celui du signal d'émission (figure 6). Le résultat est présenté dans la figure 9.

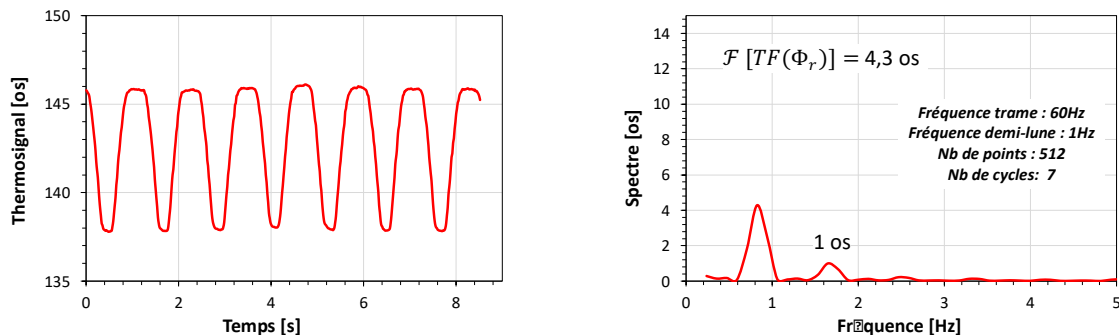


Figure 9 : Chronogramme et spectre du thermosignal de la réflexion. Le thermosignal de réflexion est moyenné sur une ligne comportant 9 IFOV. Pour le calcul du spectre, le chronogramme est fenêtré (Hann)

Nous obtenons ainsi l'amplitude du fondamental du signal réfléchi. Le rapport entre les deux amplitudes, utilisant l'équation 2 nous donne la valeur de la réflectivité bidirectionnelle. On évitera autant que faire se peut un échauffement de l'échantillon qui entacherait l'amplitude du fondamental d'une contribution émissive synchrone du signal réfléchi.

7. Érosion et réflectivité bidirectionnelle

Nous avons caractérisé différents échantillons de verre sodocalcique avec différents taux d'érosion. Les résultats de la réflectivité bidirectionnelle sont illustrés dans la figure 10.

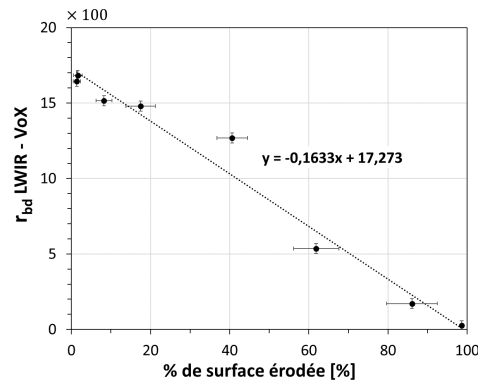


Figure 10 : Réflectivité bidirectionnelle en fonction de la surface érodée. L'incertitude combinée sur r_{bd} est de l'ordre de $\pm 2\%$. Les incertitudes sur le % de surface érodée sont indiquées dans le tableau 1

Nous observons que la réflectivité bidirectionnelle est sensible à l'érosion du verre. Cette variation est linéairement décroissante en fonction du taux d'érosion de la surface. Le coefficient de sensibilité de la réflectance bidirectionnelle est donné par $1/r_{bd} \times dr_{bd}/dx$ où x désigne le pourcentage de surface érodée. Le coefficient varie de $0,01 \text{ \%}^{-1}$ (surface érodée à 19%) jusqu'à $0,17 \text{ \%}^{-1}$ (surface érodée à 99,9%). La réflectivité bidirectionnelle se positionne dans la catégorie des mesurands intéressants pour détecter ce type de défauts.

8. Réflectivité bidirectionnelle et transmittance optique du verre

Dans la figure 11, nous présentons la relation de corrélation entre la transmittance [300 nm – 2800 nm] et la variation de la réflectivité bidirectionnelle.

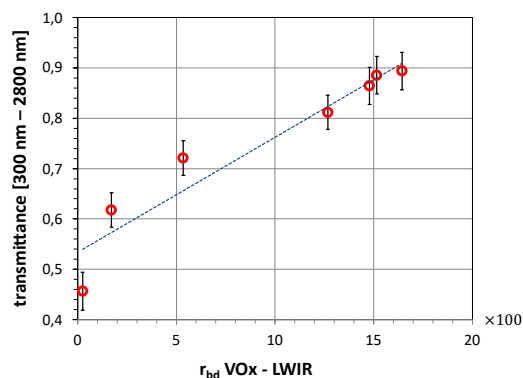


Figure 11 : Transmittance [300 nm – 2800 nm] versus la réflectivité bidirectionnelle

Le raccordement à la transmittance du verre dans le visible permet une évaluation de la gravité de l'érosion. Nous observons une variation linéaire, ce qui permet de déduire facilement l'impact sur la production énergétique à partir de la réflectivité bidirectionnelle.

9. Conclusions

La réflectance des verres érodés présente une signature spectrale caractéristique dans la bande LWIR. L'érosion produit une suppression progressive de la réflectance spéculaire. De ce fait, l'indicateur réflectivité bidirectionnelle LWIR rend compte avec une très bonne sensibilité des effets de l'érosion. Chez les verres, la variation de la réflectance spéculaire est modérée compte tenu de l'émissivité LWIR élevée de ce matériau (de l'ordre de 0,83). Si la signature spectrale de l'érosion est indépendante de la nature des matériaux (cela reste à vérifier dans un prochain travail), on peut s'attendre à des variations absolues d'autant plus importantes que l'émissivité nominale des surfaces est petite : la réflectance devrait permettre une détection encore plus fine des effets de l'érosion dans la plupart des surfaces d'émissivité LWIR inférieure à 0,8. La cartographie en réflectance bidirectionnelle LWIR ne pose en pourcentage aucun problème spécifique. Le réflectogramme fournira à terme une vue d'ensemble de l'état physico-chimique des surfaces scrutées (nous avons vérifié que les effets de la chaleur humide sur les verres sodocalciques sont aussi détectables en réflectivité bidirectionnelle). L'indicateur graphique est a priori productible in situ dans une approche totalement non intrusive et non destructive au moyen d'un appareillage simple que l'on s'efforcera de rendre compact et autonome. L'utilisation d'un environnement thermique oscillant améliore le rapport signal/bruit tout en s'affranchissant de toutes les contributions radiatives statiques sur la durée de mesure (en particulier la température d'émission de la cible). La résolution spatiale de mesure est contrainte par la règle des « 3x3 IFOV » mais reste adaptable par le choix des optiques commercialement disponibles chez les caméras LWIR.

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] Samy BRAZANE, Olivier RIOU, Fabien DELALEUX, Laurent IBOS, Jean-Félix DURASTANTI. Quantification des effets de l'érosion sur un verre sodo-calcique par émissivité apparente. *SFT Valenciennes Juin 2022*.
- [3] Communication personnelle : Clément Favey, Chercheur en Physiques Appliquées et Porteur de la Chaire Handicap & Technologie Polytech Paris-Saclay et son stagiaire Nicolas Arnoux, étudiant à l'école Polytech Paris-Saclay.
- [4] Samy BRAZANE, Olivier RIOU, Fabien DELALEUX, Laurent IBOS, Jean-Félix DURASTANTI. Assessment of thermal drift of the FLIR A325sc camera: limits and recommendations. *QIRT Paris Juillet 2022*.
- [5] Fluke Drywell 9100S Datasheet. Retrieved from: <https://docs.rs-online.com/830a/0900766b815d079c.pdf>.
- [6] Jean-Pierre Monchau. Mesure d'émissivité pour la thermographie infrarouge appliquée au diagnostic quantitatif des structures. *Thèse Université Paris-Est (2013)*.
- [7] X.P. Maldague, Theory and practice of infrared technology for non destructive testing, *Ed. Wiley 2001*.

Remerciements

Les auteurs remercient Clément Favey, Chercheur en Physique Appliquée et Porteur de la Chaire Handicap & Technologie de Polytech Paris-Saclay et son stagiaire Nicolas Arnoux pour le soutien apporté à la conception et l'impression 3D du disque deux demi-lunes, ainsi que l'IUT de Sénart-Fontainebleau et l'Université Paris-Est-Créteil pour le soutien financier de la thèse de doctorat de Samy BRAZANE.